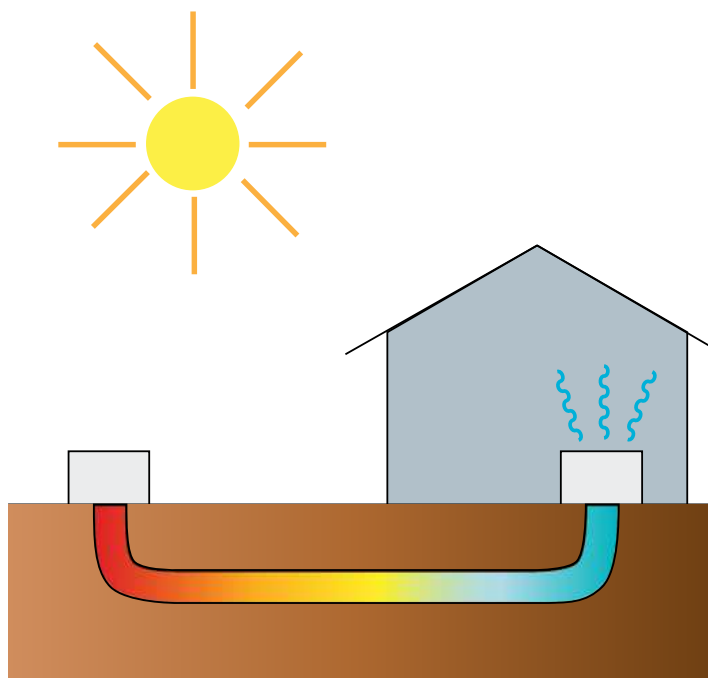




**Mónica Oliveira
Serrano Monteiro**

**Permutadores de calor ar-solo.
Análise da pré-viabilidade.**





**Mónica Oliveira
Serrano Monteiro**

**Permutadores de calor ar-solo.
Análise da pré-viabilidade.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos, realizada sob a orientação científica do Doutor Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho a todos os que têm frio ou calor dentro de casa.

o júri

presidente

Prof.^a Dr.^a Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela
professor associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Nelson Amadeu Dias Martins
professor auxiliar do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Helder José Perdigão Gonçalves
investigador principal do Departamento de Energias Renováveis do INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P.

agradecimentos

Aos meus pais.
Ao meu orientador.
Ao meu namorado.
Aos meus amigos.

palavras-chave

permutador de calor ar-solo, climatização, ventilação, tubos enterrados, energia geotérmica de baixa profundidade

resumo

A busca do Homem por um maior conforto tem levado a um maior consumo de energia e à rápida redução dos recursos naturais. Assistimos, desde há algum tempo, ao regresso às fontes energéticas renováveis, na tentativa de se conseguirem consumos sustentáveis.

Neste enquadramento redescobrimos a energia geotérmica de baixa profundidade. Esta energia resulta da grande inércia térmica do solo, em relação à energia solar que absorve. Ao estar exposto ao Sol, o solo aquece, mas como tem uma grande massa aquece muito lentamente. Pela mesma razão, o arrefecimento também é lento. Isto faz com que a sua temperatura a poucos metros de profundidade tenha uma variação muito menor do que a do ar ambiente. Consequentemente, a temperatura do solo é superior à do ar durante o Inverno e inferior durante o Verão.

Este fenómeno já era empiricamente conhecido na antiga Pérsia e continua a ser utilizado pelos povos que habitam casas escavadas no solo, de modo a tirar partido deste efeito.

Recentemente, têm sido instalados, em diferentes tipos de edifícios, sistemas de tubos enterrados onde o ar ao passar aquece ou arrefece, dependendo da sua temperatura em relação ao solo, sendo depois introduzido dentro de casa. A estes sistemas chamamos permutadores de calor ar-solo. A variação da temperatura, em alguns locais, pode ser da ordem de 10°C, durante os picos de calor ou de frio, sendo por vezes suficiente para eliminar a necessidade de aquisição de um aparelho de ar-condicionado.

Apesar de ser uma tecnologia já com provas dadas, continua a não ser muito utilizada. Neste trabalho desenvolveu-se uma ferramenta de cálculo, com base em Excel, que permite facilitar o dimensionamento de um permutador de calor ar-solo e respectiva análise de pré-viabilidade.

keywords

earth-air heat exchanger, heating, cooling, ventilation, buried pipes, low depth geothermal energy

abstract

The search of Man for a bigger comfort, has led to a bigger consumption of energy and a fast reduction of the natural resources. We are now returning to renewable energy sources, in the attempt to obtain sustainable consumptions. In this context we rediscover the low depth geothermal energy. This energy results from the great thermal inertia of the ground, in relation to the solar energy absorbed. When exposed to the Sun, the ground temperature rises; but very slowly, given its big mass. For the same reason, the cooling is also slow. As a consequence, a few meters under the surface, the temperature does not vary as much as the surrounding air, which means that the temperature of the ground is superior to the one of the air during the Winter and inferior during the Summer.

This phenomenon was already known in old Persia and is still used by communities who inhabit houses excavated in the ground, in order to benefit from this effect.

Recently, systems of underground pipes have been installed in different types of buildings. When passing the air heats or cools, depending on its temperature in relation to the ground, and is later introduced inside the house. To these systems we call earth-air heat exchangers. The variation of air temperature, in some places, can reach 10°C, during the cold or heat peaks, being often enough to avoid the purchase of an air-conditioning device.

Although being a technology that proved to work, it is not very used. In this paper a calculation tool was developed, using Excel, which facilitates the dimensioning of earth-air heat exchangers and its pre-feasibility analysis.

Índice

Lista de figuras	III
Lista de tabelas	IX
Lista de siglas.....	XI
 1 Introdução	 1
1.1 Enquadramento energético.....	1
1.2 Objectivo do trabalho	3
1.3 Climatização e ventilação	3
1.4 Permutadores de calor ar-solo.....	11
1.4.1 Energia geotérmica de baixa profundidade	11
1.4.2 Princípio de funcionamento	14
1.4.3 Vantagens e desvantagens	15
1.4.4 Impacto ambiental.....	16
1.5 Organização da dissertação	18
 2 Revisão bibliográfica	 19
2.1 Introdução.....	19
2.2 Exemplos de utilização	20
2.2.1 Edifícios residenciais	20
Edifício Oásis.....	20
Casa Solar Porto Santo	21
Urbanização AlmaVerde.....	21
2.2.2 Edifícios de serviços	26
Edifício Solar XXI.....	26
Ginásio em França	27
Edifício em Genebra	28
Edifício em Zurique.....	29
2.2.3 Edifícios agrícolas e outros	29
Estufas agrícolas	29
Pocilgas nos EUA.....	30

Jardim zoológico de Ahmedabad.....	31
Instalação de estudo.....	31
Estufa na Índia.....	32
2.3 Parâmetros de dimensionamento.....	33
2.4 Revisão de modelos de simulação.....	38
2.5 Programas de cálculo existentes.....	42
 3 Modelos físico-matemáticos	45
3.1 Modelos de temperaturas.....	45
3.1.1 Modelo de temperatura do ar exterior	46
3.1.2 Modelo de temperatura do solo.....	50
3.1.3 Modelo de transferência de calor no tubo	53
3.2 Modelo de cargas térmicas	57
3.2.1 Carga do permutador de calor ar-solo	57
 4 Implementação do algoritmo	59
4.1 Introdução	59
4.2 Introdução de dados.....	60
4.3 Cálculos energéticos	62
4.4 Bases de dados residentes	64
4.5 Análise de custos e síntese financeira	65
 5 Aplicação do algoritmo desenvolvido	69
5.1 Caso 1 – Algarve.....	70
5.2 Caso 2 – Aveiro.....	75
5.3 Estudo paramétrico	80
5.4 Análise de sensibilidade.....	84
 6 Conclusões.....	89
7 Sugestões de trabalho futuro.....	91
8 Bibliografia.....	93

Lista de figuras

Figura 1.1 – Evolução do preço do petróleo.....	2
Figura 1.2 – Residências enterradas na província de Honnan, China [18].....	4
Figura 1.3 – Esquema de funcionamento de uma bomba de calor [5].	5
Figura 1.4 – Representação de GSHP [adaptada de 12].	6
Figura 1.5 – Parede de Trombe [18].	7
Figura 1.6 – Representação do efeito chaminé [19].	9
Figura 1.7 – Temperatura do ar exterior e temperatura do solo a 5 e 15 cm de profundidade, registadas hora a hora, ao longo da 1ª semana de Maio de 2005, na Estação Meteorológica de Lameirões.	12
Figura 1.8 – Temperatura do ar exterior, registada dia a dia, ao longo do ano de 2005, na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro e temperatura do solo a 1, 2 e 4 m de profundidade calculada com um modelo de simulação para o mesmo período e local.	13
Figura 1.9 – Esquema de permutador de calor ar-solo [27].	14
Figura 2.1 – Vista exterior e interior do edifício residencial “Oásis”. [56].....	20
Figura 2.2 – Entrada dos tubos enterrados e orifícios no interior da “Casa Solar Porto Santo”. [57]	21
Figura 2.3 – Fotografia dos tubos na urbanização AlmaVerde. [59].....	23
Figura 2.4 – Gráfico das temperaturas do ar exterior e do solo a 2 m de profundidade. [58].....	25
Figura 2.5 – Gráfico das temperaturas à entrada e à saída dos tubos. [58].....	25
Figura 2.6 – Fachada Sul do edifício “Solar XXI”. [55]	27
Figura 2.7 – Planta de implantação dos tubos enterrados do “Solar XXI”. [55].....	27
Figura 2.8 – Esquema de um ginásio com telhado ventilado (1-2), permutador ar-solo (3-4) e rede de tubos (2-3 e 4-5). [51].....	28

Figura 2.9 – Esquema de um edifício que combina vários sistemas de climatização. [40].....	28
Figura 2.10 – Esquema de estufa com permutador de calor ar-solo [26].....	30
Figura 2.11 – Esquema do sistema utilizado por Sharan para estudo. [19].....	31
Figura 2.12 – Permutador de uma estufa na Índia, antes de ser coberto com terra. [21]	32
Figura 2.13 – Variação da temperatura do solo ao longo de um ano, a 1m de profundidade, calculada com um modelo de simulação, para difusibilidades de 0,001 a 0,005 m ² h ⁻¹	34
Figura 2.14 – Exemplo de colocação de dois tubos a profundidades diferentes numa vala.[33]	35
Figura 2.15 – Aspecto de uma janela de introdução de dados do programa GAEA [29].....	42
Figura 2.16 – Logotipos dos programas GAEA, ClimaSolo e RETScreen [29,32,33].....	43
Figura 3.1 – Fluxograma dos modelos de temperatura.....	45
Figura 3.2 – Gráfico da temperatura do ar ao longo do ano de 2001 medida na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando temperaturas máxima e mínima horárias para o cálculo da amplitude anual (teórico).	47
Figura 3.3 – Gráfico da temperatura do ar ao longo do ano de 2001 medida na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando temperaturas máxima e mínima das médias mensais para o cálculo da amplitude anual (teórico).....	48
Figura 3.4 – Gráfico da temperatura do ar ao longo do ano de 2001 medida na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando valores da NASA (teórico).	49
Figura 3.5 – Gráfico da temperatura do ar durante a primeira semana de 2001 medida na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando valores da NASA (teórico).....	49

Figura 3.6 – Gráfico da temperatura do solo medida a 1m de profundidade, ao longo do ano de 2005, na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando temperatura média e amplitude anual do solo iguais às do ar (teórico).....	51
Figura 3.7 – Gráfico da temperatura do solo medida a 1m de profundidade, ao longo do ano de 2005, na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando dados reais do solo (teórico).	52
Figura 3.8 – Gráfico da temperatura do solo medida a 1m de profundidade, ao longo do ano de 2005, na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando dados da NASA (teórico).....	52
Figura 3.9 – Gráficos das temperaturas de ar ambiente (a) e do solo (b), ao longo de um ano, medidas no edifício Lamparter em Weilheim na Alemanha (real) e calculadas com os modelos usando dados da NASA (teórico).	55
Figura 3.10 – Gráfico da temperatura do ar medida à saída do permutador do edifício Lamparter em Weilheim na Alemanha (real) e calculada com os modelos teóricos 1 e 2 usando dados da NASA.	55
Figura 3.11 – Gráfico da temperatura do ar medida à saída de um permutador da urbanização AlmaVerde no Algarve (real) e calculada através dos modelos teórico 1 e 2, usando valores reais de temperatura do ar e do solo como dados de entrada....	56
Figura 3.12 – Carga que é possível fornecer com um tubo ao longo de um ano em Aveiro.....	57
Figura 4.1 – Fluxograma geral do algoritmo desenvolvido.....	59
Figura 4.2 – Aspecto da folha “Início”.....	61
Figura 4.3 – Aspecto da folha “Modelos”.....	62
Figura 4.4 – Aspecto da folha “Análise de custos”.....	65
Figura 4.5 – Aspecto da folha “Síntese financeira”.....	67

Figura 5.1 – Sinalização da quadrícula a que se referem os dados utilizados para o Algarve[44].	70
Figura 5.2 – Gráfico anual resultante da aplicação dos modelos aos dados da NASA para a região do Barlavento Algarvio.	72
Figura 5.3 – Gráfico referente à última semana de Julho, calculado com o modelo.	72
Figura 5.4 – Folha de “Síntese financeira” para o Algarve.	73
Figura 5.5 – Sinalização da quadrícula a que se referem os dados utilizados para Aveiro[44].	75
Figura 5.6 – Gráfico anual resultante da aplicação dos modelos aos dados da NASA para a região de Aveiro.	77
Figura 5.7 – Gráficos referentes à última semana de Julho, calculados com os modelos.	77
Figura 5.8 – Aspecto da folha “Síntese financeira” para o projecto Aveiro.	78
Figura 5.9 – Variação da energia fornecida com o comprimento do tubo.	80
Figura 5.10 – Variação da energia fornecida com o diâmetro do tubo.	81
Figura 5.11 – Variação da energia fornecida com a profundidade do tubo.	81
Figura 5.12 – Variação da energia fornecida com a velocidade do ar no tubo.	82
Figura 5.13 – Variação do custo inicial máximo com o comprimento.	82
Figura 5.14 – Variação do custo inicial máximo com o diâmetro.	83
Figura 5.15 – Variação do custo inicial máximo com a profundidade.	83
Figura 5.16 – Variação do custo inicial máximo com a velocidade.	84
Figura 5.17 – Variação da energia produzida com a temperatura ar-Sol.	84
Figura 5.18 – Variação da energia produzida com a difusibilidade.	85
Figura 5.19 – Variação da energia produzida com a temperatura de conforto de Inverno.	85
Figura 5.20 – Variação da energia produzida com a temperatura de conforto de Verão.	86
Figura 5.21 – Variação da energia produzida com o coeficiente de desempenho de aquecimento do sistema de comparação.	86

Figura 5.22 – Variação da energia produzida com o coeficiente de desempenho de arrefecimento do sistema de comparação. 87

Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Comparação de tipos de energia, técnicas de exploração e seus produtos.....	16
Tabela 2.1 – Melhoria no desempenho energético de arrefecimento. [4].....	26
Tabela 4.1 – Valores para o ar utilizados no algoritmo.	64
Tabela 4.2 – Valores para o solo utilizados no algoritmo.	64
Tabela 5.1 – Tabela com dados para o caso do Algarve.	71
Tabela 5.2 – Tabela com dados para o caso de Aveiro.	76

Lista de siglas

Sigla	Unidade	Descrição
α	m^2/h	difusibilidade do solo
γ	---	factor relacionado com a cor da parede
μ	N s m^{-2}	viscosidade
ρ	kg/m^3	massa volúmica
a	---	inércia térmica do edifício
A	m^2	área
Amp	$^{\circ}\text{C}$	amplitude - metade da gama de temperatura
CF	---	<i>cash-flow</i>
CFC's	---	clorofluorcarbonetos
cp	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	calor específico
D	m	diâmetro do tubo
E	Wh	energia
fase	h	hora mais quente
FS	---	factor solar
GSHP	---	<i>Ground Source Heat Pump</i> – bomba de calor geotérmica
h	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	coeficiente de transferência de calor por convecção
I	W/m^2	radiação solar
INETI	---	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
k	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	condutividade
L	m	comprimento do tubo
\dot{m}	kg/s	caudal mássico de ar
NASA	---	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	---	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
n	unidade	número
Nu		número de Nusselt

NUT	---	número de unidades de transferência
Pd	m	altura de cada piso (pé direito)
Pr	---	número de Prandtl
q	W	carga
r	m	raio
Re	---	número de Reynolds
RPH	---	número de renovações de ar por hora
SI	---	Sistema Internacional
t	h	tempo
T	°C	temperatura
U	W/K	transferência de calor por convecção
v	m/s	velocidade do ar
\dot{v}	m ³ /s	caudal volúmico de ar
z	m	profundidade
%	%	percentagem

Índice

0	total do período
1	influência do tubo no solo
contacto	contacto do ar com os tubos
e	parede do edifício (envolvente)
entrada	entrada dos tubos
int	ar no interior do edifício
jan	área de janelas, relativa à área de cada piso
p	piso
parede	exterior da parede exposta ao Sol
px	peçoas que ocupam o edifício
t	tubos do permutador
tubo	ar à saída do tubo

1 Introdução

1.1 Enquadramento energético

Desde a primeira utilização do fogo pelo Homem, usamos combustíveis para produção de energia no nosso dia-a-dia. À medida que os países se desenvolvem as suas necessidades energéticas aumentam. Com as sociedades modernas tem aumentado muito o consumo de recursos fósseis. Enquanto nos países pobres se verifica um avanço da desertificação devido ao consumo de lenha, nos países ricos paira a dúvida de quando acabará o petróleo. Quer seja apenas para cozinhar ou para utilizar a grande panóplia de dispositivos eléctricos, no fundo todo o mundo está intimamente dependente do carbono. Apercebemo-nos há várias décadas que esta taxa de consumo é superior à produção que o planeta tem para nos oferecer, ou seja, deixou de ser sustentável.

Além da desertificação e dos recursos cada vez mais escassos, da queima dos combustíveis à base de carbono resulta dióxido de carbono. Este é um gás com efeito de estufa, contribuindo assim para o aquecimento global. Para tentar evitar as alterações climáticas e os seus efeitos, vários países assinaram o protocolo de Quioto, comprometendo-se a diminuir as emissões de gases com efeitos de estufa.

Há já muito tempo que se desenvolvem tecnologias com base em fontes renováveis. Este investimento é motivado por questões ambientais, mas principalmente por razões políticas e económicas. O facto dos principais produtores de petróleo serem países politicamente instáveis e muito propícios a guerras faz com que o preço e disponibilidade deste produto sejam também

instáveis [1]. Nos últimos anos o preço do petróleo tem subido em flecha, como pode ver-se na Figura 1.1.



Figura 1.1 – Evolução do preço do petróleo.

A aposta em energias renováveis por parte de países não produtores de petróleo reduz a sua dependência energética do exterior, uma vez que as energias renováveis podem ser produzidas internamente.

Além destes problemas de oferta, existem problemas emergentes de procura. Países em desenvolvimento, como a China e a Índia, vão querer atingir níveis de conforto e industrialização como no Ocidente e já se notam os efeitos do aumento da sua procura.

Num futuro próximo os combustíveis fósseis como o carvão, gás natural e derivados do petróleo continuarão a ser as principais fontes de energia. Mas à medida que o preço a pagar por estes se for tornando superior ao custo de produzir energia com fontes renováveis, vamos assistir a uma mudança que já começou [1].

Portugal importa cerca de 80% da energia que consome. Isto deixa o país totalmente dependente das flutuações dos mercados estrangeiros. Não se

compreende como é que com uma taxa de insolação tão elevada não se explora ao máximo o potencial solar. Transportes e edifícios são os sectores onde gastamos mais energia [2].

1.2 Objectivo do trabalho

Desenvolvimento de uma ferramenta informática, em formato Excel, que permita fazer estudos de pré-viabilidade técnica e económica de sistemas de climatização de edifícios, usando tubos enterrados como permutadores de calor ar-solo.

1.3 Climatização e ventilação

Para nos sentirmos bem em casa, na escola, no trabalho ou em espaços de lazer, necessitamos de alguma comodidade. Ter ar com qualidade, temperatura e humidade adequadas, ter boa acústica e iluminação, são características que fazem parte do conforto que um edifício deve oferecer.

Os animais que escavam as suas tocas no chão procuram, além de segurança, algum conforto térmico. Tal como eles, desde o início da sua história, o Homem escolheu grutas onde se pudesse refugiar de predadores e do rigor do clima. Casas escavadas no solo continuam a ser utilizadas pelos homens tanto nos climas muito frios como nos muito quentes (ver Figura 1.2)[3].

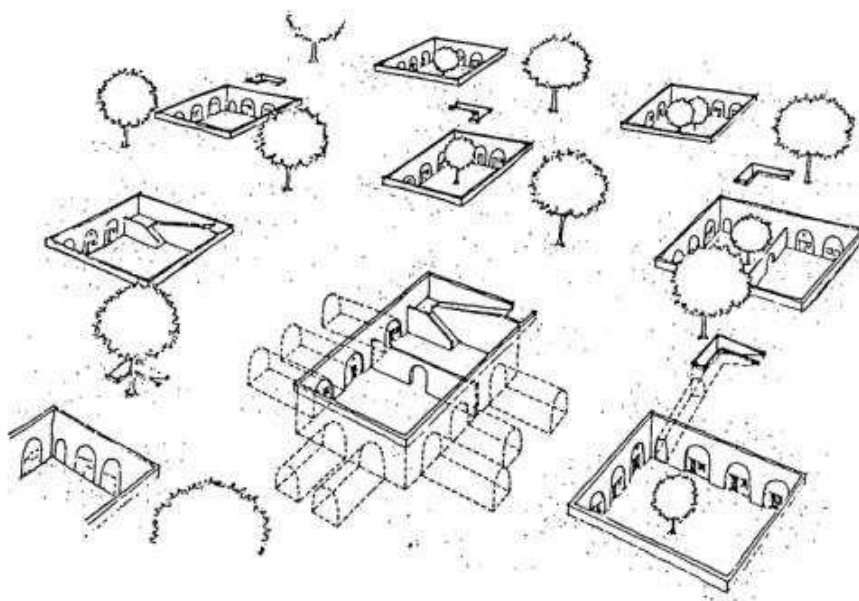


Figura 1.2 – Residências enterradas na província de Honnan, China [18].

Noutros locais, teve de improvisar abrigos de troncos e ramos de árvores, que foram evoluindo de forma a construir cabanas. Estas tinham muitas frestas por onde entrava o vento e a chuva. Foram então tapadas com lama ou peles de animais, constituindo assim os primeiros isolamentos. O próximo passo foi a utilização de blocos de pedra ou de argamassa seca ao Sol, que evoluíram até ao tijolo. A introdução do ferro no betão permitiu a construção de estruturas cada vez mais altas e resistentes, mas continuamos à procura de mais conforto.

“Em Portugal quase todos os edifícios são construídos com alvenarias de tijolo furado, com pouco peso próprio e isolamento mínimo, com estruturas de betão-armado anti-sísmicas, telhas de barro sobre coberturas inclinadas de betão armado e rebocos de cimento nas paredes e tectos. Problemas graves de condensação e bolor são tolerados culturalmente e sistemas domésticos de aquecimento não são habitualmente instalados. Para além disto na maior parte dos casos não existem documentos contratuais nem métodos de medição e o envolvimento de profissionais na construção é limitado.” [4].

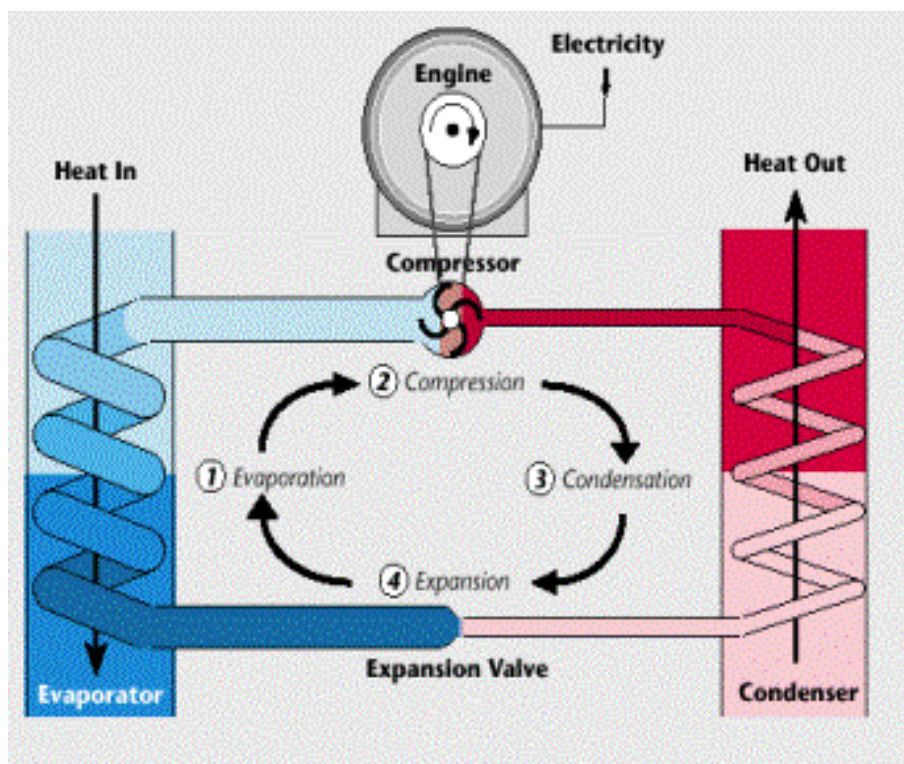


Figura 1.3 – Esquema de funcionamento de uma bomba de calor [5].

O problema da temperatura e humidade em ambientes fechados foi solucionado com a invenção do ar-condicionado em 1902. Este aparelho funciona como uma bomba de calor, ou seja, consome energia para “bombear” calor de uma fonte fria para uma fonte quente. A transferência é feita com um líquido refrigerante, escolhido de forma a evaporar na fonte quente e condensar na fonte fria (ver Figura 1.3).

Tradicionalmente ambas as fontes são o ar interior ou exterior. No entanto, na Suíça existem patentes de 1912, onde surge a ideia de usar o solo como depósito ou fonte de calor [6]. Uma vez que a poucos metros de profundidade a temperatura do solo se mantém aproximadamente constante durante todo o ano, este pode ser usado como dissipador de calor no Verão e como fonte quente no Inverno. Deste modo a bomba de calor tem uma maior eficiência e não está sujeita a variações de temperatura tão elevadas como as do ar [7]. Estes sistemas são vulgarmente designados por GSHP (*Ground Source Heat Pump* – bomba de calor geotérmica) [8,9,10].

Na maior parte dos casos, o calor é transferido entre o solo e o líquido refrigerante do aparelho através de água que atravessa um circuito separado (ver Figura 1.4). Os refrigerantes usados dentro das bombas de calor, quer sejam aparelhos de ar-condicionado ou GSHP, têm algum impacto ambiental (como os CFC's) e têm vindo a ser substituídos [11].

Em 1985, nos Estados Unidos da América, estavam em operação em edifícios comerciais e residenciais apenas 14 000 GSHP. Em 2005 estimava-se instalar 400 000 equipamentos naquele país, num total acumulado de 2 milhões [6]. Apesar de já existirem também em vários países da Europa (incluindo Portugal), a sua implementação no mercado ainda está no início [8].

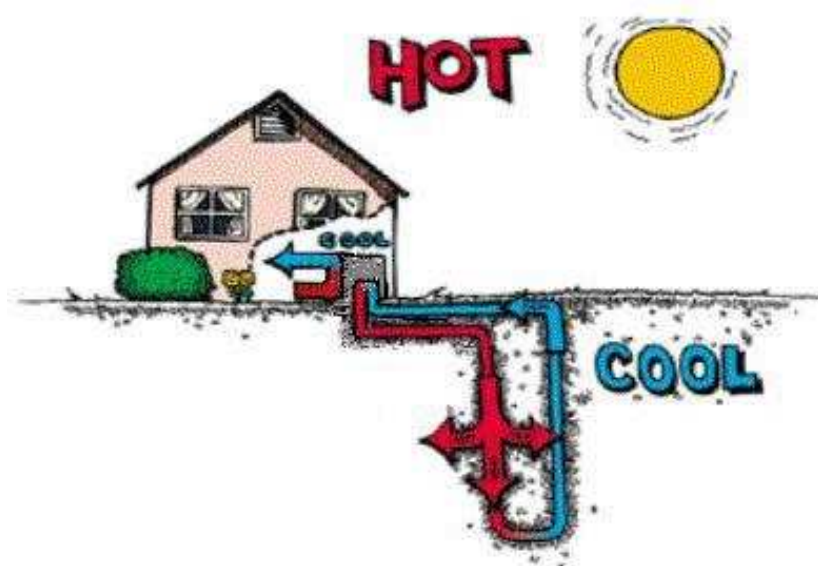


Figura 1.4 – Representação de GSHP [adaptada de 12].

A utilização do ar-condicionado é dispendiosa a nível energético, sendo a utilização de GSHP uma forma de reduzir os consumos. Para um correcto funcionamento de ambos, os edifícios devem ter as janelas fechadas. Verifica-se que muitas vezes existem janelas abertas, mesmo tendo aparelhos de ar-condicionado ou aquecedores ligados. Este facto levou a que fossem construídos edifícios totalmente fechados. Nestes, a insuficiente renovação de ar leva à degradação da qualidade do ar interior. Outro problema é a falta de limpeza dos

filtros dos aparelhos, fazendo com que haja acumulação de pó e crescimento de organismos como ácaros que aumentam o número de alergias. Muitos prédios deste tipo foram considerados “edifícios doentes”, o que levou a repensar a necessidade de ventilação. Seria interessante que houvesse um manual de instruções da climatização de cada edifício.

Conforto traz mais saúde e rendimento e, cada vez mais, quando se constrói um edifício deve ter-se em consideração que este não pode ser uma simples caixa, mas que deve servir para acomodar pessoas, plantas e animais. A crescente preocupação com o ambiente tem levado ao surgimento de novas estratégias de climatização de ambientes interiores, com redução do consumo de energia.

A arquitectura bioclimática ou solar inclui várias técnicas como a orientação, isolamento, iluminação, escolha de equipamentos, protecção exterior com vegetação e ventilação natural [12,14,15,16,17].

Para aquecer os edifícios, podem ser usadas, por exemplo, paredes de Trombe ou armazenamento em massa de água. Nas paredes de Trombe uma massa de ar é aquecida entre o vidro e a parede e move-se depois para o interior do espaço a aquecer através de aberturas (ver Figura 1.5). Estes sistemas devem prever o seu sombreamento ou aberturas para o exterior de forma a evitar o sobreaquecimento do local.

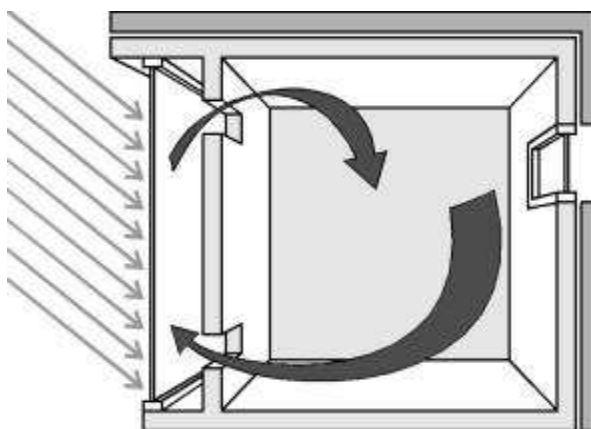


Figura 1.5 – Parede de Trombe [18].

Existe também a possibilidade de armazenar o calor da radiação solar em massas de água. Reservatórios estrategicamente colocados em paredes ou colunas aquecem durante o dia, libertando o calor por radiação à noite [18].

A arquitectura bioclimática utiliza técnicas como palas sobre as janelas que são calculadas de forma a permitir que os raios solares entrem dentro de casa no Inverno, mas não no Verão. Utilizam-se também árvores de folha caduca para o mesmo fim ou arbustos para proteger dos ventos.

A iluminação natural é feita através de janelas poupando energia eléctrica. A iluminação artificial precisa de energia para a utilização das lâmpadas. Ambas influenciam a carga térmica do edifício pelo que deve haver um cuidado na sua escolha. As pessoas aceitam uma maior amplitude de temperatura e luminosidade se estas forem naturais. Ambientes com estes parâmetros constantes são demasiado artificiais e monótonos, perdendo-se a noção do tempo.

Para arrefecer os edifícios, usam-se processos evaporativos e processos que facilitem a ventilação natural. Os processos evaporativos baseiam-se na diminuição de temperatura associada à mudança de fase da água do estado líquido ao estado de vapor. O ar ao passar numa zona com água aumenta a sua humidade e arrefece. Se não quisermos introduzir humidade dentro de casa, podemos simplesmente arrefecer as superfícies exteriores [18].

Na ventilação natural é necessário promover diferenças de pressão, distribuindo janelas para que o movimento de ar seja facilitado. Utilizam-se aberturas em locais altos para promover o efeito chaminé em que o ar quente sai por cima, entrando ar fresco por baixo (ver Figura 1.6).

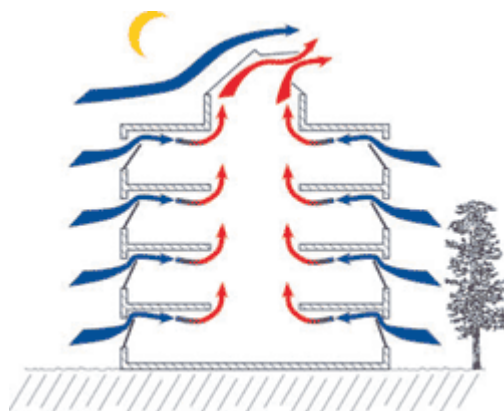


Figura 1.6 – Representação do efeito chaminé [19].

Quando a renovação de ar é feita pela sua densidade e pela força do vento é denominada ventilação natural, ao contrário da ventilação mecânica que é feita através de ventoinhas. A ventilação natural continua a ser o modo mais comum de assegurar o fornecimento de ar fresco nos edifícios.

Nos permutadores de calor ar-solo (tema central da dissertação e que será explicado detalhadamente no capítulo 1.4), para se ter um maior controlo do caudal de ar, usa-se normalmente ventilação mecânica. O ar do exterior é forçado a passar através de tubos enterrados, onde o solo serve como fonte de calor para aquecer o ar de Inverno e como depósito de calor para arrefecer o ar de Verão. A renovação do ar interior é feita a uma temperatura mais próxima da temperatura de conforto. A necessidade energética de aquecimento e arrefecimento é assim reduzida, sendo nalguns casos totalmente eliminada. Já existiam sistemas deste tipo na antiga Pérsia. Mais recentemente foram aplicados em currais e estufas [19]. Desde então as aplicações têm sido alargadas e muito trabalho tem sido feito nesta área de forma a compreender, simular e otimizar o desempenho destes sistemas. Uma análise mais detalhada dos modelos de simulação e programas de cálculo existentes será feita nos capítulos 2.4 e 2.5.

É muito importante reduzir o consumo de energia em primeiro lugar. Quanto menos energia se necessita, menos quilowatts se tem de produzir ou pagar. As energias renováveis providenciam energia limpa e o bom consumidor irá combinar estas tecnologias com eficiência energética. Não faz sentido produzir energia com

tecnologia muito avançada se é para a seguir gastar em aparelhos esbanjadores de energia, mau isolamento ou uma arquitectura pobre [12]. Tentar manter a temperatura num edifício mal isolado é como tentar manter uma banheira cheia de água tendo o ralo destapado.

A arquitectura de edifícios eficientes requer equilíbrio entre um bom desempenho energético e um conforto interior aceitável. Muitos esforços têm sido feitos para melhorar as condições térmicas dos edifícios nas últimas décadas, por exemplo através de ferramentas de simulação térmica e da construção de envolventes quase perfeitas, com bons isolamentos.

Projectos bem planeados e construções bem executadas trazem poupança de dinheiro.

1.4 Permutadores de calor ar-solo

De forma a compreender melhor o que são e como funcionam os permutadores de calor ar-solo, teremos inicialmente de conhecer a energia que os torna úteis.

1.4.1 Energia geotérmica de baixa profundidade

A energia solar é bem conhecida na sua utilização directa, tanto para aquecimento de água como produção de electricidade. É também o Sol que aquece as massas de ar, provocando assim diferenças de densidade, o que leva à movimentação destas, fenómeno a que chamamos vento. A energia eólica é pois, em última análise, resultante da energia do Sol. Esta mesma conclusão pode ser tirada para outras energias renováveis, tal como a energia geotérmica de baixa profundidade.

A designação “baixa profundidade” surge em oposição à energia geotérmica de grande profundidade, que é mais conhecida e provém do interior do planeta. A radiação solar, ao atingir a superfície terrestre, é também absorvida pelo solo. Este aquece enquanto está exposto ao Sol, durante o dia, e liberta calor para a atmosfera, durante a noite. Devido à sua enorme massa, o solo demora a aquecer e a arrefecer, facto que se denomina de inércia térmica. Como as camadas superficiais são as primeiras a aquecer, mas também as primeiras a arrefecer, a variação da temperatura é grande, isto é, a sua amplitude térmica é maior que nas camadas inferiores. À medida que aumenta a profundidade a inércia é cada vez maior, ou seja, cada vez o solo demora mais a aquecer ou a arrefecer. Isto faz com que a temperatura em profundidade esteja “atrasada” em relação à superfície, o que se denomina desfasamento e que as variações sejam cada vez menores, ou seja, existe uma atenuação. O desfasamento e a atenuação dependem também do tipo de solo (ver cap. 2.3). A partir de uma determinada profundidade a temperatura é aproximadamente constante e igual à temperatura

média. Isto faz com que, no Verão, a temperatura do solo seja inferior à temperatura do ar e vice-versa, no Inverno. Esta diferença de temperatura pode ser aproveitada, sendo denominada de energia geotérmica de baixa profundidade.

Na Figura 1.7 podem ver-se as diferenças de temperatura explicadas no parágrafo anterior. O tempo está dividido em períodos de 24 horas, num total de 7 dias. A cor-de-rosa está a temperatura do ar. Esta oscila bastante comparada com a temperatura do solo. De dia a temperatura do ar ultrapassa a temperatura do solo, sendo que à noite arrefece, ficando abaixo da temperatura do solo. As temperaturas do solo representadas foram registadas a 5 e 15 cm de profundidade, azul-escuro e claro respectivamente. Embora sejam apenas 10 cm de diferença, nota-se o desfasamento e a atenuação com a profundidade. O gráfico azul claro tem os seus pontos máximos e mínimos sempre depois dos do azul-escuro. Os máximos do azul-escuro são mais altos enquanto que os mínimos são mais baixos.

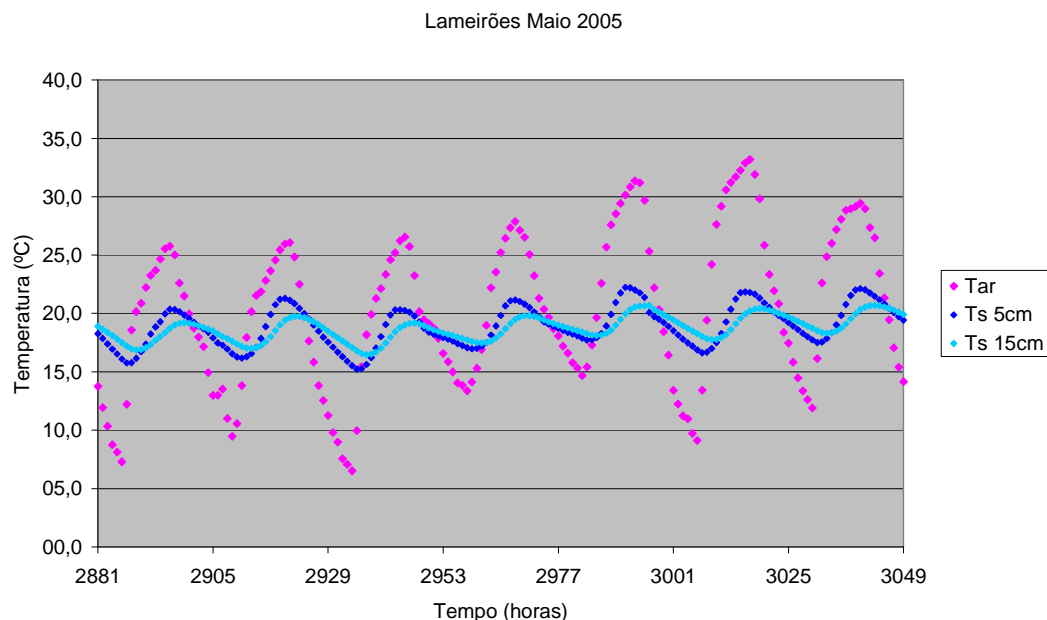


Figura 1.7 – Temperatura do ar exterior e temperatura do solo a 5 e 15 cm de profundidade, registadas hora a hora, ao longo da 1ª semana de Maio de 2005, na Estação Meteorológica de Lameirões.

Na Figura 1.8 o tempo está dividido em períodos de 730 horas, aproximadamente correspondentes a um mês, num total de 1 ano. É visível que a temperatura do ar oscila mais do que a do solo e que as temperaturas do solo variam menos e atrasam com a profundidade. É importante notar que a temperatura do solo em profundidade é mais alta que a do ar no Inverno (início e fim do gráfico) e mais baixa no Verão (meio do gráfico). Este é o fenómeno em que se baseiam os permutadores de calor ar-solo.

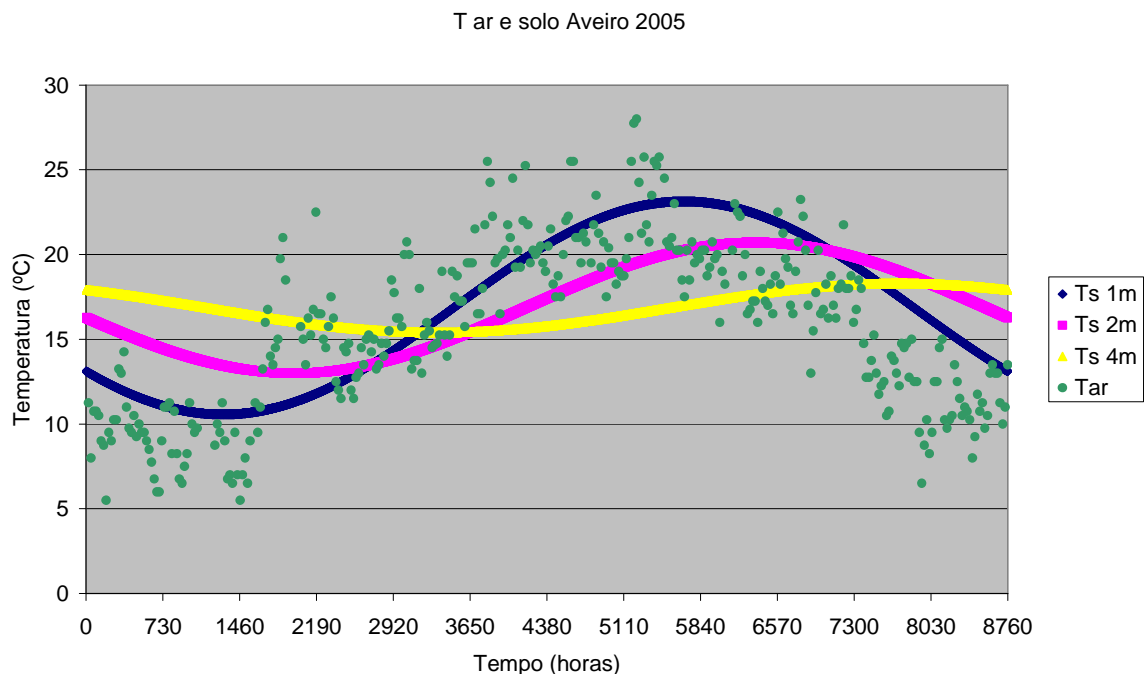


Figura 1.8 – Temperatura do ar exterior, registada dia a dia, ao longo do ano de 2005, na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro e temperatura do solo a 1, 2 e 4 m de profundidade calculada com um modelo de simulação para o mesmo período e local.

1.4.2 Princípio de funcionamento

Um permutador de calor ar-solo consiste num ou vários tubos enterrados, através dos quais o ar pode trocar calor com o solo (ver Figura 1.9). O calor é transferido no solo e até ao tubo, essencialmente, por condução; a transferência do tubo para o ar é feita sobretudo por convecção.

Devido à inércia térmica do solo, a temperatura deste é inferior à do ar exterior no Verão e superior no Inverno. Este facto permite que o ar, ao passar nos tubos, arrefeça de Verão e aqueça de Inverno. O ar arrefecido ou aquecido pode ser usado para ventilar e climatizar um edifício. Os permutadores também podem ser usados com ar vindo do interior do edifício, contudo não é muito comum. Em muitos casos o arrefecimento é totalmente garantido, noutros será o aquecimento [21].

Na maioria dos casos os permutadores de calor são apenas uma parte do sistema de climatização do edifício. Por exemplo, num clima como o de Portugal o permutador pode ser suficiente para o arrefecimento, contudo necessitará de uma contribuição para o aquecimento. Esta “ajuda” poderá ser aquecimento a óleo, a gás, eléctrico ou outro.

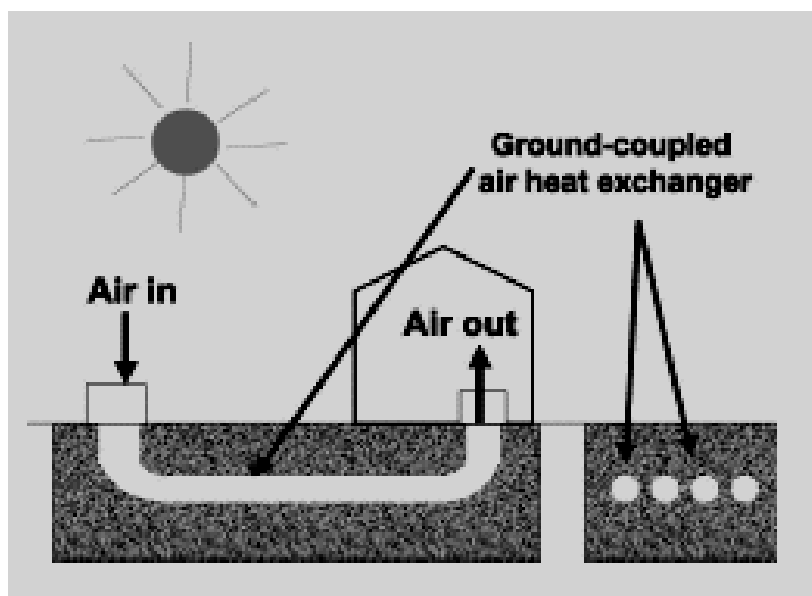


Figura 1.9 – Esquema de permutador de calor ar-solo [27].

Na bibliografia surgem diferentes designações para sistemas com o mesmo princípio de funcionamento:

ETVS – earth tube ventilation system,
ETHE – earth tube heat exchanger,
EAHE, EAHX – earth air heat exchanger,
ATEHE, AEHX – air to earth heat exchanger,
EAT – earth air tunnel,
GCHE – ground coupled heat exchanger,
ECT – earth cooling tubes,
GCAS – ground coupled air system,
ETS – earth tube system.

Surgem também as palavras “*pipe*” e “*channel*” além de “*tube*” e “*tunnel*”.

1.4.3 Vantagens e desvantagens

Vantagens

A energia geotérmica de baixa profundidade é simples de compreender e está disponível em todo o mundo. Os permutadores de calor ar-solo são fáceis de construir e têm várias funções (aquecer, arrefecer e ventilar). Permitem a ventilação do edifício sem abrir janelas, o que reduz a entrada de ruído exterior e aumenta a segurança. A sua utilização pode considerar-se sustentável, uma vez que utilizam pouca energia comparada com a que produzem. Não utilizam água que em certos locais é escassa nem líquidos refrigerantes prejudiciais ao ambiente. O investimento inicial é muito mais baixo que nos GSHP. A manutenção necessária é muito pouca, durante o seu longo período de funcionamento. Para uma duração de operação superior a 20-30 anos, é uma solução melhor que o aquecimento convencional [22].

Desvantagens

Os custos iniciais podem ser elevados uma vez que é necessária área de terreno disponível, além do material e mão-de-obra. É recomendada a sua instalação durante a construção do edifício. Estando a indústria pouco desenvolvida, os sistemas ainda não se ajustam na perfeição a diferentes situações. Necessitam, muitas vezes, de métodos de climatização complementares. Podem acumular humidade, favorecendo o crescimento de microorganismos. A médio prazo (3-10 anos) um GSHP é uma solução melhor do ponto de vista económico [22].

1.4.4 Impacto ambiental

A queima de combustíveis fósseis para a produção de energia causa um impacto ambiental negativo. A sua diminuição pode acontecer de duas maneiras: redução de consumos ou produção de energia sustentável. Surgiu a dúvida em qual destes dois grupos (redução ou produção) os permutadores de calor se poderiam enquadrar, uma vez que ao utilizá-los reduzem-se os consumos de climatização, mas, por outro lado, estamos a produzir ar quente ou frio, o que é uma forma de energia. A resposta surge da comparação com outras energias.

Tabela 1.1 – Comparação de tipos de energia, técnicas de exploração e seus produtos.

Tipo de energia	Técnica de exploração	Produto
Geotérmica baixa profundidade	Permutadores de calor ar-solo	Ar quente ou frio
Solar	Painéis solares	Água quente
Solar	Painéis fotovoltaicos	Electricidade
Eólica	Turbinas eólicas	Electricidade
Combustão	Turbinas vapor	Electricidade

Sendo a energia solar uma fonte renovável, ao aquecermos água com esta energia, através de painéis solares, estamos a reduzir o consumo de outra fonte energética. Do mesmo modo, a energia geotérmica de baixa profundidade é uma energia renovável, sendo os permutadores de calor ar-solo equivalentes aos painéis solares. Em vez de água quente, o resultado produzido é ar quente ou frio (ver Tabela 1.1).

As necessidades de consumir água quente, electricidade ou de climatizar uma casa mantêm-se independentemente das fontes de energia. A redução dos consumos só é possível se diminuirmos a necessidade energética. Assim os permutadores de calor ar-solo são uma técnica de exploração de uma energia renovável e enquadram-se na produção de energia e não na redução de consumos.

Ao usarmos esta técnica estamos a reduzir o impacto ambiental pois vamos diminuir a necessidade de produzir energia através de técnicas mais poluentes. Contudo utilizar energias renováveis para produzir energia que vai ser esbanjada em seguida é incoerente. Assim, os permutadores de calor ar-solo devem ser utilizados em edifícios bem isolados e onde se utilizem equipamentos de baixo consumo.

Aparentemente o impacto ambiental, causado pela climatização com esta técnica, parece ser muito reduzido comparado com o ar-condicionado. No entanto, existe sempre o impacto da produção dos materiais utilizados e do consumo de energia pelo ventilador. A temperatura do solo é ligeiramente alterada localmente, o que pode influenciar as comunidades de organismos existentes no solo e os que aí se fixam. Contudo, dada a grande capacidade térmica do solo, o efeito de introduzir ou retirar calor através dos tubos não é significativo na temperatura global [23]. A nível visual o impacto é nulo uma vez que os tubos ficam enterrados, o que não sucede com a energia eólica ou solar que têm bem visíveis as turbinas ou painéis.

1.5 Organização da dissertação

O texto inicia com uma introdução alargada que enquadra os permutadores de calor ar-solo no contexto energético e de climatização e ventilação.

No segundo capítulo faz-se uma revisão bibliográfica, onde se apresentam vários exemplos de utilização prática dos permutadores de calor e dos parâmetros, modelos e programas de simulação teóricos.

Os modelos físico-matemáticos seleccionados para a ferramenta de cálculo criada expõem-se no capítulo 3. Seguidamente explicam-se o algoritmo utilizado no programa criado e dois casos da sua aplicação.

Finalmente apresentam-se as conclusões e sugestões de trabalho futuro.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Introdução

A bibliografia existente sobre permutadores de calor ar-solo mostra que desde há vários anos tem sido feito muito trabalho nesta área e que continua a ser um tema com interesse actualmente. Para alguém que investigue sobre este tema pela primeira vez é de salientar a quantidade de sistemas instalados e em funcionamento e a sua distribuição por vários países. Da revisão feita, apresentam-se alguns exemplos de utilização de forma a perceber melhor a variedade dos diferentes permutadores de calor instalados (cap. 2.2).

Embora os permutadores de calor ar-solo sejam uma tecnologia já conhecida, ainda não são utilizados em grande escala. Tal pode dever-se ao facto de não existirem muitas ferramentas de análise da viabilidade técnica e económica da utilização dos tubos nas diversas situações reais. Da bibliografia analisada, apresenta-se uma explicação dos vários parâmetros de dimensionamento e uma referência a alguns dos diferentes modelos de simulação (cap. 2.3 e 2.4).

O tamanho e disposição dos tubos no terreno estão normalmente condicionados, devido a questões de espaço e orçamento. A preocupação principal é saber se adicionar mais um tubo ou acrescentar o tubo existente resultará numa melhoria do rendimento económico. Por isso é necessário uma ferramenta simples e rápida que calcule o desempenho do sistema [27].

Para poder ter noção dos preços a pagar antes de investir, têm sido criados programas que aliam a tecnologia à economia, calculando a quantidade de energia que se poupa de forma a poder comparar o seu custo com o do investimento (cap. 2.5).

2.2 Exemplos de utilização

Na bibliografia encontram-se vários exemplos de utilização de permutadores de calor ar-solo. Nem sempre está disponível a informação considerada adequada. No entanto, no exemplo da urbanização AlmaVerde foi possível apresentar uma descrição com bastante mais informação que nos outros exemplos, uma vez que neste caso houve possibilidade de vários contactos, incluindo uma visita ao local, sempre com muita disponibilidade das pessoas contactadas e abertura ao fornecimento do maior número de dados possíveis.

2.2.1 Edifícios residenciais

Edifício Oásis

O edifício “Oásis” é uma moradia unifamiliar isolada, em zona rural a Norte de Faro (Algarve). Tem uma variedade de sistemas, dos quais se destacam os grandes vãos a Sul (ganho directo) bem como as paredes de armazenamento (ganho indirecto), com as devidas protecções solares (palas fixas e estores exteriores). Tem um conjunto de tubos enterrados no solo, que funcionam como sistema de aquecimento e arrefecimento, em determinados períodos, tirando partido da temperatura da terra. Conta também com uma estufa para pré-aquecimento do ar de insuflação na casa, no Inverno [56].



Figura 2.1 – Vista exterior e interior do edifício residencial “Oásis”. [56]

Casa Solar Porto Santo

A “Casa Solar Porto Santo” foi desenhada pelo Arqº. Gunther Ludewig e também conta com um sistema de permutadores de calor ar-solo. [57]



Figura 2.2 – Entrada dos tubos enterrados e orifícios no interior da “Casa Solar Porto Santo”. [57]

Urbanização AlmaVerde

A “Casa Borboleta” recebeu uma menção especial do Prémio de Eficiência Energética em Edifícios, da Direcção Geral de Energia. Esta casa faz parte de uma urbanização onde existem mais exemplos de permutadores de calor instalados e foi onde se encontraram mais dados disponíveis que a seguir são apresentados [4,58].

Enquadramento da AlmaVerde

A Comissão Europeia, através do Programa de Demonstração THERMIE, financiou o projecto Coolhouse. A componente portuguesa deste projecto consistiu na construção de seis vivendas, que integraram a primeira fase de desenvolvimento da urbanização AlmaVerde – Village and Spa.

Este empreendimento localiza-se no Oeste Algarvio, a 10 km de Lagos, no concelho de Vila do Bispo (37º08'N, -8º43'W). Está prevista a construção de cerca de 180 habitações, campos de ténis, piscinas, ginásio, restaurantes e creche,

distribuídos pelos quase 36 hectares de uma antiga quinta, onde apenas 10% da área total será destinada à construção.

Com um clima considerado mediterrânico, esta zona tem uma temperatura média anual de 18 °C, 3000 h de insolação por ano e ventos predominantes de Noroeste.

Desenvolvimento da AlmaVerde

As construções tradicionais estavam adaptadas ao clima local, contudo as técnicas utilizadas mais recentemente não são tão boas a nível térmico, pelo que foi necessário repensar o modo de construir.

Foi dada especial importância aos materiais naturais, como a pedra e telha, tendo as casas paredes de adobe (blocos de barro cozido ao Sol no local, que permitem aumentar a massa térmica e controlar a humidade) e acabamentos em madeira. Utilizaram-se técnicas como o uso de vegetação quebra-vento, ventilação natural devido ao efeito de chaminé criado por um pé direito elevado, vidros duplos e bom isolamento. Existem telheiros que deixam passar o Sol de Inverno mas não de Verão. Todas as casas têm sistemas Coolhouse de arrefecimento de baixo custo energético, contudo nem todas as divisões têm distribuição de ar. O aquecimento é feito com uma caldeira de condensação a gás. Cada divisão tem um termostato que permite regular a temperatura ambiente. Estes sistemas pretendem substituir o uso de ar-condicionado, pelo que não foram instalados aparelhos deste tipo. Uma vez que se revelaram viáveis técnica e economicamente nas primeiras seis vivendas, a AlmaVerde utiliza sistemas Coolhouse em todos os edifícios entretanto construídos.

Características do permutador de calor

O sistema Coolhouse consiste num permutador de calor ar-solo, filtragem do ar e distribuição do ar pela casa através de uma caixa-de-ar sob o pavimento e de ranhuras ao nível do rodapé. A entrada de ar exterior localiza-se a 1,5 m de altura na fachada Noroeste da casa, para que se faça maioritariamente numa zona de

sombra e está protegida com uma rede contra insectos. De seguida o ar atravessa dois tubos de PVC com cerca de 30 m de comprimento e 16 cm de diâmetro. Os tubos estão enterrados a 1,5 m de profundidade, descendo até aos 2 m e distanciados entre si 2 m sempre que possível. O troço final ascendente tem uma inclinação de 45°, para reduzir a resistência do ar. O sistema permite a limpeza dos tubos com água à pressão e detergente, sendo estes posteriormente removidos por uma bomba.

O ar é aspirado e distribuído com recurso a um ventilador de 170 W, localizado à saída dos tubos juntamente com a unidade de filtragem. A velocidade do ar é regulável pelo utilizador até um máximo de 4 m/s. [59]



Figura 2.3 – Fotografia dos tubos na urbanização AlmaVerde. [59]

Monitorização

A construção das seis vivendas teve início no final de 2001 e terminou no primeiro trimestre de 2003. A monitorização começou em Julho de 2003 e o relatório foi apresentado em Janeiro 2004. Obtiveram-se dados do final da época de arrefecimento e do início da época de aquecimento.

Foram monitorizadas pela Faber Maunsell - *Sustainable Development Group* (Reino-Unido) três das seis moradias incluídas no projecto. A casa nº54 é utilizada como casa de demonstração e tem a particularidade de possuir dois sistemas Coolhouse independentes. Quando começou a monitorização, a casa nº56 estava a ser pintada por dentro e a casa nº57 já estava a ser habitada por um casal de reformados, há alguns meses.

Foi utilizado um sensor no exterior da casa 54, abrigado do Sol e da chuva, para medir a temperatura do ar exterior e do solo a 2 m de profundidade. Foram colocados sensores de temperatura à entrada e saída dos tubos das casas 54 e 56. Em todas as casas foram medidas as temperaturas da sala de estar e do quarto principal. Na casa 54 foi ainda registada a temperatura num segundo quarto e na casa 56 no escritório. Os sensores foram programados para adquirirem dados de 30 em 30 minutos. Foi também monitorizado o consumo dos ventiladores.

Durante a monitorização ocorreram alguns problemas, como por exemplo: incompatibilidade de *software*, avaria de equipamento e necessidade de novas escavações para colocar o sensor de temperatura do solo. Devido a problemas na instalação das caldeiras a gás, o ar vindo dos tubos não era aquecido, o que dava a sensação de corrente de ar frio e os ocupantes da casa 57 desligaram o sistema Coolhouse a partir de Outubro 2003.

Resultados

Visualizando o gráfico da temperatura do ar exterior e do solo a 2 m de profundidade (Figura 2.4), é possível verificar que a temperatura do solo acompanha suavemente, ao longo do tempo, a variação de temperatura do ar, mantendo-se, no entanto, bastante abaixo dos picos de calor no Verão e bastante acima dos picos de frio no Inverno.

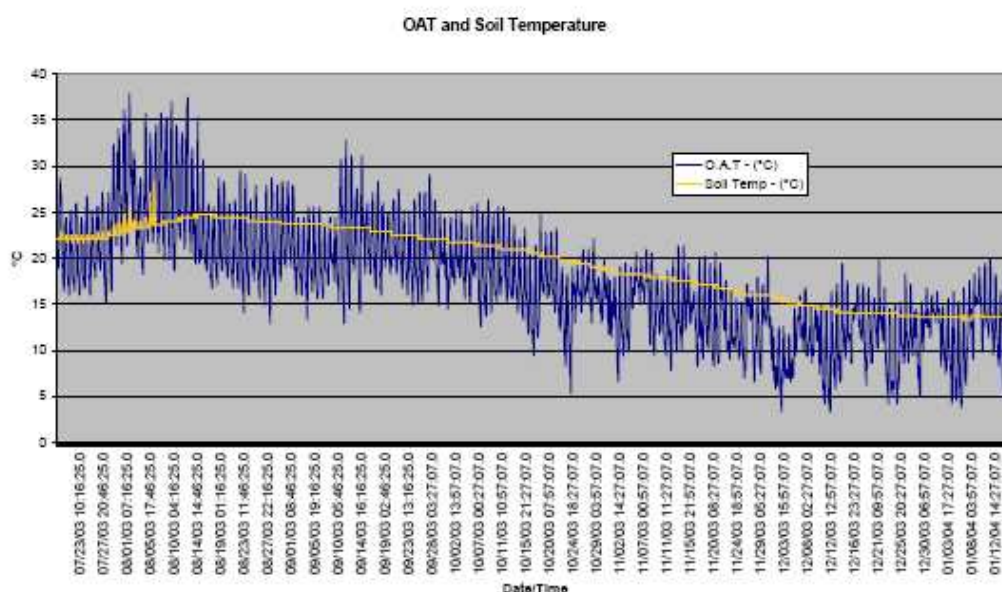


Figura 2.4 – Gráfico das temperaturas do ar exterior e do solo a 2 m de profundidade. [58]

Na Figura 2.5, embora se note alguma variação na temperatura do ar à saída dos tubos devida à variação da temperatura à entrada, aquela acompanha de perto a temperatura do solo, verificando-se que o permutador é eficaz a remover os extremos de temperatura.

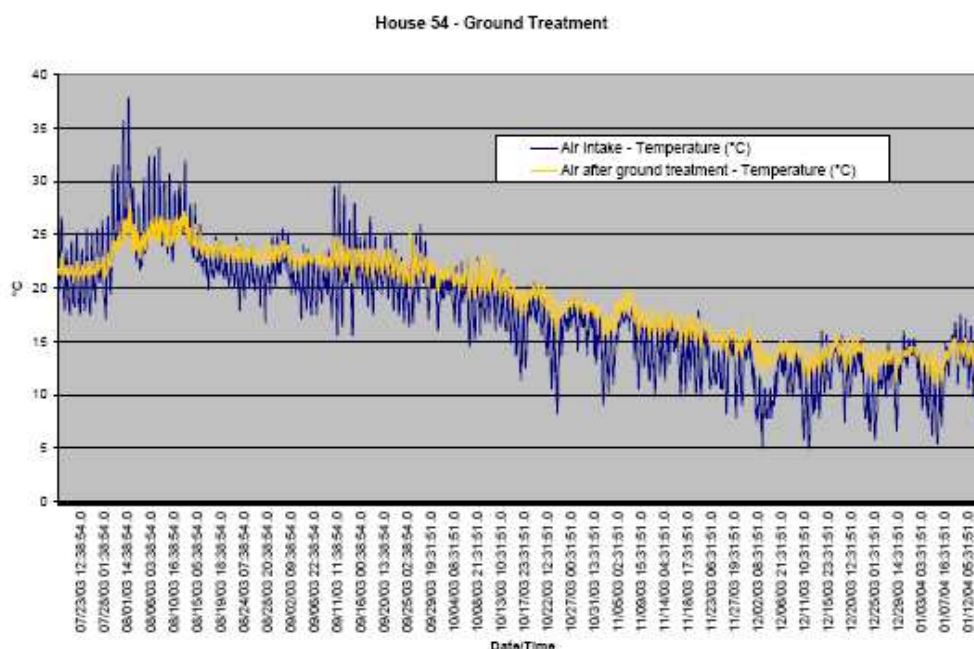


Figura 2.5 – Gráfico das temperaturas à entrada e à saída dos tubos. [58]

Durante o período de monitorização ultrapassaram-se as expectativas criadas com os resultados de modelações computacionais que haviam sido feitas, tendo-se atingido, à saída dos tubos, na casa 54, reduções de temperatura de 11 °C no Verão e 8 °C mais altas no Inverno ou durante a noite. Os resultados foram semelhantes para o permutador da casa 56.

O sucesso dos tubos é devido também, em grande parte, ao nível de isolamento e massa térmica dos edifícios.

Consumindo energia apenas com a unidade de tratamento de 170 W, obtém-se um fornecimento de 2500 W de arrefecimento.

Tabela 2.1 – Melhoria no desempenho energético de arrefecimento. [4]

Sistema de ventilação	Ar Condicionado convencional	Sistema Coolhouse
Capacidade de arrefecimento	2500 W	2500 W
Potência	700 W	170 W
COP - Coeficiente de desempenho	3,5	14,7
Emissões de CO ₂ (funcionando 1000 horas por ano)	79,1 kg carbono / ano	19,21 kg carbono / ano

2.2.2 Edifícios de serviços

Edifício Solar XXI

O “Solar XXI” pertence ao INETI e localiza-se em Lisboa. Foi desenhado para ser energeticamente eficiente. É um edifício com funções de serviços (salas e gabinetes de trabalho) e laboratórios, com uma área total de 1500 m² dividida por 3 pisos, um dos quais semi-enterrado. À primeira vista destaca-se a enorme quantidade de painéis fotovoltaicos, mas é a 4,6 m abaixo da superfície que estão

32 tubos de manilhas de cimento com diâmetro de 30 cm e cerca de 15 m de comprimento (ver Figura 2.7) [55].



Figura 2.6 – Fachada Sul do edifício “Solar XXI”. [55]

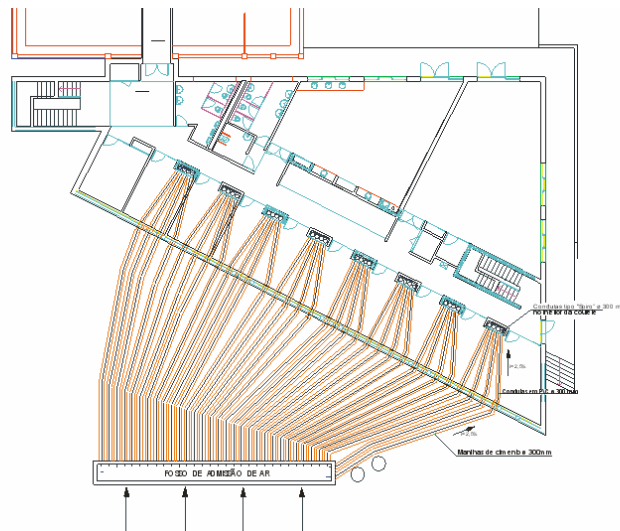


Figura 2.7 – Planta de implantação dos tubos enterrados do “Solar XXI”. [55]

Ginásio em França

Em França, foi estudado um ginásio com um telhado ventilado e um permutador de calor ar-solo, com tubos de plástico de diferentes diâmetros, enterrados debaixo do edifício a 1,7 m de profundidade [51]. Concluíram que os tubos

enterrados são uma solução apropriada para o pré-aquecimento do ar, mesmo em combinação com o telhado ventilado.

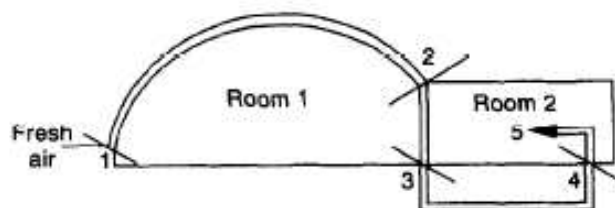


Figura 2.8 – Esquema de um ginásio com telhado ventilado (1-2), permutador ar-solo (3-4) e rede de tubos (2-3 e 4-5). [51]

Um estudo realizado na Suíça analisou os dois edifícios que se seguem [40].

Edifício em Genebra

Um bloco de habitação e comércio, localizado em Genebra, com 2900 m² de área climatizada, utiliza além do permutador ar-solo, um telhado metálico para entrada de ar e um permutador de calor entre o ar que sai do edifício e o ar que entra (ver Figura 2.9). Tem um sistema de 49 tubos de PVC, com 12,5 cm de diâmetro e 50 m de comprimento, enterrados 50 cm abaixo do estacionamento subterrâneo, com uma distância axial de 30 cm. [40]

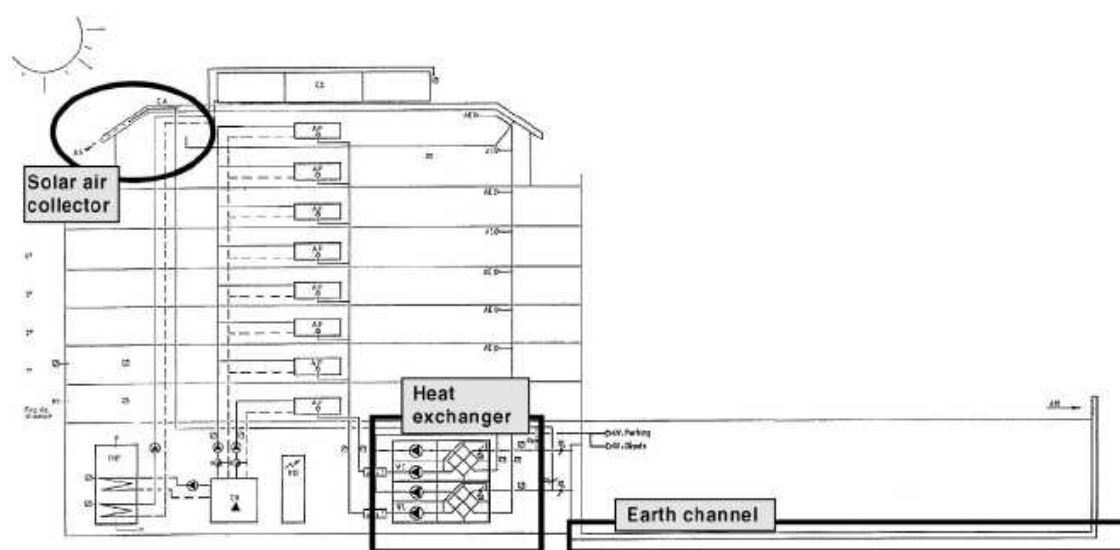


Figura 2.9 – Esquema de um edifício que combina vários sistemas de climatização. [40]

Edifício em Zurique

Num edifício de comércio e escritórios, localizado em Zurique, com 8050 m² de área climatizada o permutador ar-solo é constituído por 43 tubos, com 25 cm de diâmetro e 23 m de comprimento, enterrados 75 cm abaixo da segunda cave (aprox. a 6 m de profundidade), com uma distância axial de 116 cm.

No Inverno as renovações de ar são mantidas no mínimo, enquanto que de Verão o aumento das renovações de ar melhora a resposta do sistema.

O estudo conclui que o pré-aquecimento do ar com os tubos enterrados é mais caro do que com combustível e tem sempre de ter outro sistema de aquecimento. Pelo contrário, no arrefecimento pode tornar-se competitivo, evitando a aquisição de ar-condicionado e permitindo a redução do consumo de electricidade e da emissão de CFC's. Deste modo, o pré-aquecimento pode ser visto como um serviço adicional, que terá de ser conjugado com outras técnicas de aquecimento. Em relação às infiltrações de água nos tubos, estas prejudicam o aquecimento, mas melhoram o arrefecimento. No entanto levantam questões sanitárias devido à água estagnada. Este problema pode ser evitado, usando um circuito fechado de água e um permutador água-ar. Ao analisarem esta solução verificaram que o capital de investimento é mais baixo. [40]

2.2.3 Edifícios agrícolas e outros

Estufas agrícolas

O artigo [26] compila dados de 18 estufas, localizadas em diferentes países como: Turquia, Canadá, França, Itália, Grécia, Rússia e Reino-Unido. Os tubos utilizados foram instalados durante os anos 80 e têm diâmetros de 10 a 20 cm, são de plástico, alumínio ou betão, estão enterrados de 50 cm a 2 m de profundidade e

distanciados entre si cerca de 40 cm. Os tubos são utilizados principalmente para aquecimento durante as noites ou no Inverno (chegando a atingir uma temperatura 10 °C acima da temperatura de uma estufa sem este sistema), mas também para arrefecer de Verão. Não foram observados problemas significativos devido à condensação de humidade.

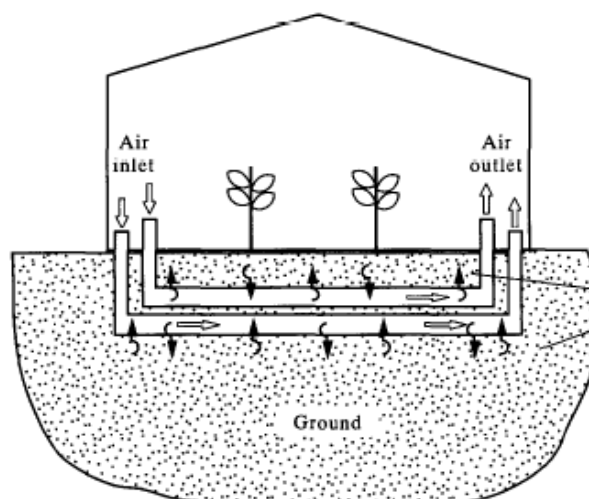


Figura 2.10 – Esquema de estufa com permutador de calor ar-solo [26].

Pocilgas nos EUA

Nos Estados Unidos da América, foi proposta a instalação de tubos enterrados para melhorar as condições de vida de animais em pocilgas. O principal objectivo era ter uma entrada de ar na zona de desmame, completamente separada das zonas de crescimento, de forma a evitar contaminações dos juvenis. Desta forma previu-se uma redução do número de animais doentes e consequente aumento de produção. A redução dos custos de climatização foi considerada como uma vantagem adicional [54].

Girja Sharan participou em vários artigos onde são estudados permutadores de calor ar-solo [19,21,46,52,53] (ver 3 exemplos seguintes).

Jardim zoológico de Ahmedabad

Em 2000, foram instalados no jardim zoológico, em Ahmedabad, na Índia, 2 tubos de 20 cm de diâmetro, com 30 m de comprimento, distanciados 1,5 m. O ar produzido por estes tubos conseguiu reduzir a temperatura da jaula de um tigre em 10 °C durante o Verão, sem gastar água e subir 10 °C durante o Inverno, mesmo com o espaço aberto. À entrada dos tubos colocaram uma rede para prevenir a entrada de pássaros, insectos e outros animais. [52]

Instalação de estudo

Em Thor, na Índia, instalaram 1 tubo de 10 cm de diâmetro e 50 m de comprimento a 3 m de profundidade. Com uma ventoinha de 400 W, garantiram uma velocidade do ar de 11 m/s. Este permutador foi instalado simplesmente para estudo do comportamento térmico, tendo sensores de temperatura no início, no meio e no fim. Das temperaturas registadas, verifica-se que na primeira metade do tubo o ar consegue aproximar-se mais rapidamente da temperatura do solo do que na segunda. Com este sistema conseguiu-se aquecer o ar de 9 °C para 23 °C e arrefecer de 41 °C para 31 °C. [19]

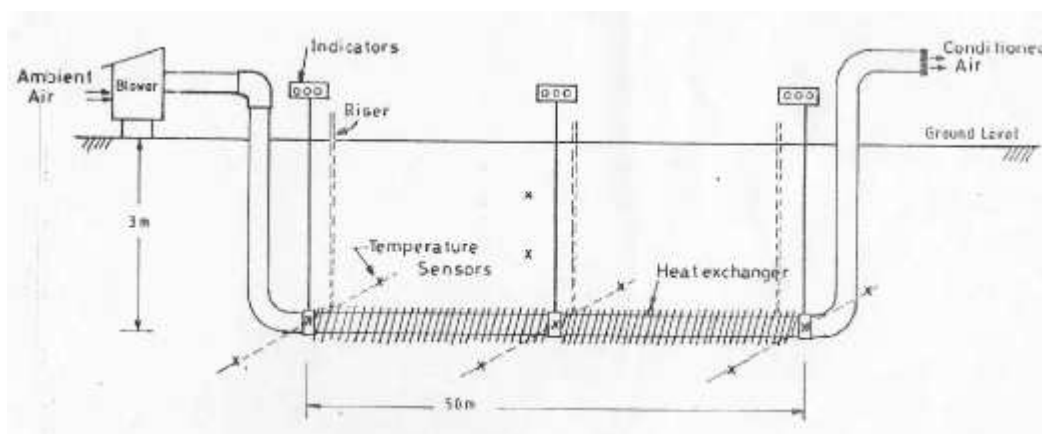


Figura 2.11 – Esquema do sistema utilizado por Sharan para estudo. [19]

Estufa na Índia

Mais tarde, com os dados recolhidos anteriormente, decidiram montar um permutador de calor ar-solo debaixo de uma estufa em Kothara, na Índia. Utilizaram 8 tubos de aço, com 20 cm de diâmetro e 23 m de comprimento, 4 enterrados a 2 m e outros 4 a 3 m de profundidade, distanciados 1,5 m entre si. Com uma velocidade de 8 m/s em cada tubo, fornecem um caudal de 7200 m³/h que equivale a 20 renovações por hora.

Uma vez que o aquecimento só é necessário durante dois meses, este sistema consegue suprir todas as necessidades, tendo-se registado, nas noites frias de Inverno, um aquecimento de 9 °C para 23 °C, em apenas meia hora. Durante a estação quente a estufa tem outras técnicas de arrefecimento como o sombreamento e a evaporação de água. Com o permutador de calor, obteve-se uma redução de 7 °C.

Esta estufa está localizada numa região muito árida e com problemas de qualidade da água. Com este sistema conseguiu-se um aumento da produção de tomate de 2,7 vezes em relação às plantações ao ar livre e com menos 34% de água. A produção de pimento foi alargada no tempo, na qualidade e na quantidade. [21]



Figura 2.12 – Permutador de uma estufa na Índia, antes de ser coberto com terra. [21]

2.3 Parâmetros de dimensionamento

No dimensionamento do sistema a instalar muitos são os parâmetros a ter em conta. No entanto as variáveis com as quais mais se “joga” são: comprimento, diâmetro e número de tubos assim como profundidade e velocidade do ar [24].

Para começar temos de ter uma estimativa da carga térmica do edifício. A carga térmica é a quantidade de calor que é necessário remover ou adicionar ao edifício de modo a controlar a sua temperatura. Esta depende do tipo de utilização do edifício assim como da sua localização.

As pessoas, assim como a iluminação e o equipamento eléctrico, aquecem o ambiente em que se encontram. Como tal, torna-se necessário estimar também a contribuição destes três factores de forma a poder calcular a carga térmica.

Ao seleccionarmos um nível de conforto bloqueamos as variáveis de temperatura e humidade internas e o número mínimo de renovações de ar.

O desenho do edifício, a sua implantação no terreno e a selecção dos materiais de construção influenciam a quantidade de energia que será necessária para a sua climatização e ventilação. Existem várias técnicas que podem ser aplicadas na fase de desenho, contudo, para edifícios já existentes nem sempre é possível fazer grandes alterações.

Ao seleccionarmos uma localização para o edifício a climatizar estamos desde logo a bloquear parâmetros relacionados com a meteorologia (temperatura e humidade do ar exterior e insolação). Usualmente o tipo de solo é também condicionado pela localização. No entanto não é de todo impossível que se utilize um solo diferente escavado noutra local.

Os diferentes tipos de solo podem ser caracterizados por diversas variáveis. Contudo o parâmetro “difusibilidade térmica” resume as características mais importantes para o estudo do comportamento térmico.

“A difusibilidade térmica (α) indica a penetração de calor no solo e pode ser definida como sendo o quociente entre a condutividade térmica (k) e a capacidade térmica (C_v), ou seja, $\alpha = k/C_v$. É a mudança, em graus Celsius, que ocorre num segundo, quando o gradiente de temperatura aumenta $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}^3$. A difusibilidade térmica do solo aumenta com o aumento da humidade atingindo um máximo, depois então decresce. Uma pequena quantidade de água no solo, entre as partículas, reduz o efeito isolante do espaço poroso cheio de ar (aumenta o valor de k), mas um aumento muito grande no conteúdo de água resulta num aumento acentuado da capacidade térmica, diminuindo o aumento da temperatura produzido por uma determinada quantidade de calor, uma vez que a capacidade térmica da água, que é alta, substitui a do ar que é quase negligenciável. A matéria orgânica diminui a difusibilidade, devido ao aumento da porosidade, enquanto que a compactação do solo a aumenta, porque diminui a porosidade. A difusibilidade térmica dos solos está entre 10^{-3} e $10^{-2}\text{ cm}^2\text{ s}^{-1}$.”[25].

Solos com maior difusibilidade respondem mais rapidamente às diferenças de temperatura, diminuindo os efeitos desejados de desfasamento e atenuação (ver Figura 2.13).

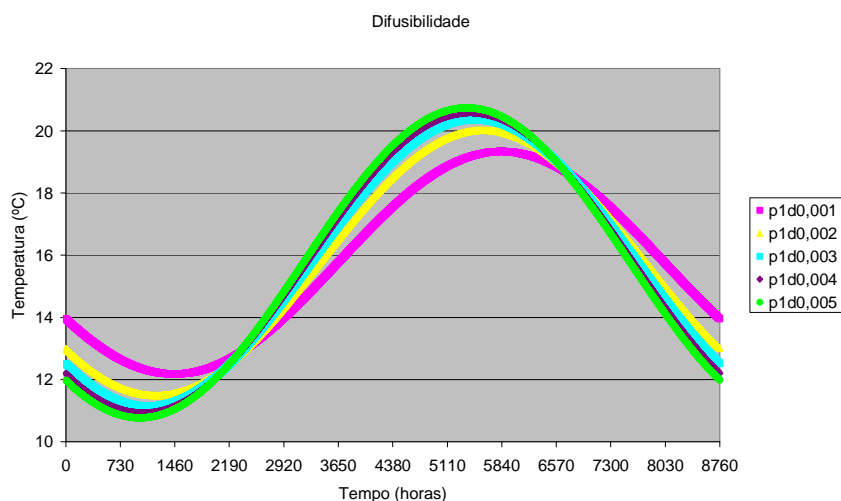


Figura 2.13 – Variação da temperatura do solo ao longo de um ano, a 1m de profundidade, calculada com um modelo de simulação, para difusibilidades de 0,001 a 0,005 m² h⁻¹.

Se, para algum clima e tipo de solo, a temperatura do solo não estiver na gama desejada, pode ser modificada através de uma alteração da superfície. Para aumentar a temperatura, a superfície pode ser escurecida ou coberta por uma estrutura tipo estufa. Para reduzir a temperatura pode sombrear-se o local, regá-lo ou pintá-lo de branco [23]. Um solo que esteja coberto por erva é mais fresco do que um que esteja sem vegetação [24].

Como a maior parte das vezes não se escolhe o tipo de solo do local e a cobertura da superfície é principalmente definida por razões estéticas ou práticas, o mais importante é ter em conta a profundidade a que se enterram os tubos.

Quanto maior a profundidade mais estável é a temperatura. No entanto, para profundidades maiores fica mais caro escavar o terreno. Uma solução utilizada é na mesma vala ter tubos a diferentes profundidades (ver Figura 2.14).

Quando se pretende tirar maior partido das variações diárias do que das anuais, devem seleccionar-se profundidades menores, uma vez que assim a energia acumulada durante o dia é usada durante a noite.

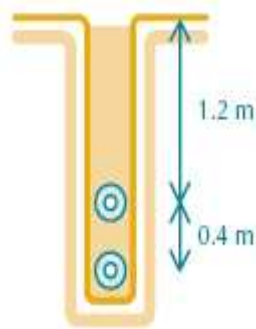


Figura 2.14 – Exemplo de colocação de dois tubos a profundidades diferentes numa vala.[33]

Na escolha da profundidade deve ter-se em conta a necessidade de uma inclinação mínima dos tubos de 2%, para que caso haja condensação de humidade ou caso se queira limpar os tubos com detergentes líquidos estes possam escorrer para uma ponta onde sejam recolhidos.

As profundidades mais comuns situam-se entre 1 e 3 m.

Seleccionada a profundidade, é necessário decidir que tubos se irão utilizar. O material dos tubos pode ser metal, betão ou plástico. Embora todos sejam utilizados, não foram encontrados estudos comparativos entre estes materiais. Sendo o metal melhor condutor de calor, pareceria ser a melhor escolha, contudo, devido à inércia do solo, esta propriedade não é uma vantagem significativa. O metal oxida com a humidade o que faz com que a sua escolha não seja sempre considerada. O betão tem propriedades semelhantes às do solo, o que leva à sua escolha em algumas situações. No entanto este material é poroso, permitindo que a humidade do solo passe para o ar, o que pode ser uma vantagem no Verão, mas é uma desvantagem no Inverno. O maior inconveniente do betão é mesmo o seu peso, o que faz com que a operação de instalação seja mais morosa e por isso mais cara. O plástico, embora aparentemente seja o material menos ecológico, é o mais barato, não oxida e não permite a entrada de humidade do solo. Também devido à sua vasta distribuição em vários tamanhos e à sua facilidade de montagem, é uma escolha frequente.

Na escolha do material dos tubos é preciso também ter em conta a sua resistência à pressão, uma vez que a força que o solo exerce sobre o tubo aumenta com a profundidade.

Independentemente do material escolhido, o objectivo ideal seria conseguir que o ar que atravessa o permutador saísse à temperatura a que se encontra o solo. Para tal é necessário que existam condições que permitam a troca de calor entre ambos. A área e o tempo de contacto entre o ar e o tubo são fundamentais.

A área de contacto é determinada pelo comprimento, diâmetro e número de tubos; o tempo de contacto varia também com a velocidade a que o ar atravessa o permutador. Fica assim definido o caudal de ar.

A temperatura do ar aproxima-se da do tubo rapidamente no início e mais lentamente depois. Tubos compridos aumentam a perda de carga. Pode compensar ter dois tubos com metade do tamanho, em vez de um comprido.

Para a mesma área de contacto, o que significa sensivelmente a mesma quantidade de material, diâmetros pequenos funcionam melhor, mais não seja porque o comprimento aumenta.

Mesmo para comprimentos e velocidades do ar iguais, diâmetros pequenos podem funcionar melhor, uma vez que a transferência de calor entre a parede do tubo e o ar é feita por convecção, sendo mais eficaz que a condução entre as partículas de ar [24,26].

A velocidade do ar deve ser suficiente para fornecer um caudal que garanta o número previsto de renovações de ar e ainda assim ser baixa para dar tempo de climatizar o ar.

O permutador de calor ar-solo funciona com ventilação mecânica, pelo que deverá ser tido em conta que as variáveis anteriores juntamente com as perdas de carga dentro dos tubos influenciam a potência necessária para a ventoinha e quanto maior for esta, maior a quantidade de energia gasta.

Em relação ao número de tubos aparentemente quanto mais melhor [27]. Uma vez que estes fazem variar a temperatura do solo que os rodeia, deve ser dimensionado um intervalo entre eles para diminuir a interferência. Os resultados de um estudo mostram que a influência do tubo na temperatura do solo circundante é limitada a uma distância de duas vezes o seu diâmetro [28]. Quanto mais tubos e maior a distância entre eles, maior a área de terreno necessária e maiores os custos de escavação para os colocar.

Os vários parâmetros estão muito ligados entre si e deles dependem os custos do sistema a instalar, pelo que deve ser sempre feito um estudo paramétrico, de forma a verificar quais as melhores opções a nível técnico e económico.

2.4 Revisão de modelos de simulação

Em 2006 foi feita uma revisão aprofundada de sistemas, modelos e aplicações de permutadores de calor [28], de onde foi retirada informação para este capítulo.

Mihalakakou et al [34] apresentam um modelo completo para a previsão da variação diária e anual da temperatura à superfície do solo. O modelo usa uma equação diferencial transitória da condução de calor e uma equação do balanço de energia à superfície da terra para prever a temperatura. A equação do balanço de energia envolve a convecção entre o ar e o solo, a radiação solar absorvida pela superfície da terra, o fluxo de calor latente devido à evaporação à superfície da terra assim como a radiação emitida pela superfície.

O modelo é validado com temperaturas medidas de hora a hora, durante 10 anos, para solo sem vegetação ou coberto com erva curta, em Atenas e Dublin. Os resultados são comparados com resultados correspondentes dos modelos que usam a análise de Fourier. Além disso, é executada uma análise de sensibilidade para investigar a influência dos vários parâmetros envolvidos na equação do balanço de energia à superfície da terra, no perfil de temperatura do solo.

Encontram-se na literatura diversos modelos de cálculo para permutadores de calor com o solo. Os modelos mais antigos usam, geralmente, uma descrição unidimensional dos tubos para obter uma relação entre a temperatura de entrada e a de saída. Tzaferis et al [35] analisaram oito modelos para prever o desempenho de permutadores de calor ar-solo. Os algoritmos dos modelos estudados ou calculam a condução de calor dos tubos para o solo ou calculam a transferência de calor por convecção do ar para os tubos. Os dados de entrada incluem as características geométricas do sistema, as características térmicas do solo e do tubo, juntamente com a temperatura do solo não perturbado durante a operação do sistema ou apenas a temperatura da superfície dos tubos. Os algoritmos dos oito modelos foram introduzidos em programas de computador para simular o comportamento dos permutadores de calor ar-solo. Os resultados experimentais

de um tubo horizontal de PVC, enterrado a uma profundidade de 1,1m, foram também comparados com os valores calculados. Seis dos oito modelos deram resultados muito próximos aos valores reais com um erro, em cada caso, de aproximadamente 3,5%. Nos modelos examinados, a capacidade térmica da terra não é considerada e consequentemente a influência dos diferentes tubos entre si e os perfis de temperatura na terra não podem ser estudados.

Mihalakakou et al [36] apresentam um modelo em que o solo ao redor do tubo e o próprio tubo são descritos em coordenadas polares. Neste modelo os perfis de temperatura e da humidade do solo são incluídos nas equações. A influência da temperatura à superfície da terra é modelada pela sobreposição da solução algébrica do campo não perturbado da temperatura causado pela temperatura de ar à superfície e do campo da temperatura causado pelo tubo. Os autores mostram a importância de incluir a humidade do solo. O modelo é resolvido no TRNSYS (um programa da simulação de sistemas de energia) e validado com bons resultados.

Mihalakakou et al [37] investigaram o potencial de aquecimento de um único tubo, assim como o potencial de um sistema de múltiplos tubos em paralelo. Um modelo numérico exacto foi usado para investigar o desempenho térmico dinâmico do sistema durante o período do Inverno em Dublin. O modelo tinha sido validado com sucesso através de um extensivo conjunto de dados experimentais. Os resultados mostram que o potencial de aquecimento do sistema durante o Inverno é significativo.

Bojic et al [38] desenvolveram um modelo em que o solo é dividido em camadas horizontais com temperatura uniforme. Todos os tubos são colocados numa camada à mesma profundidade e paralelos entre si. É calculado o calor transportado para o solo por convecção do ar e pela radiação solar. Também é usada uma equação que descreve o fluxo de calor entre o ar no tubo e a camada vizinha do solo. Todas as equações usadas para as camadas do solo são

equações de estado estacionário. Este modelo é bidimensional não sendo possível avaliar a influência que os tubos têm entre si.

Gauthier et al [39] descrevem um modelo inteiramente tridimensional. É usado um sistema simples de coordenadas cartesianas e os tubos redondos são substituídos por tubos quadrados de áreas equivalentes. As propriedades termofísicas da terra são consideradas constantes e independentes da temperatura, apesar de, na realidade, a terra não ser homogênea. Desta maneira, podem ser avaliados a influência das diferentes camadas de terra, as fundações de betão e o isolamento. A transferência de calor causada por gradientes de humidade na terra é considerada insignificante em relação à que é causada por gradientes de temperatura. A transferência de calor nos permutadores é dominada pela convecção no sentido axial, mas está relacionada com o campo de temperatura no solo através das condições limite da superfície dos tubos. O modelo é validado com dados experimentais de um permutador de calor instalado numa estufa comercial. Finalmente, são examinados os vários parâmetros que afectam o comportamento do sistema.

Hollmuller e Lachal [40] avaliaram o potencial de pré-aquecimento no Inverno e de arrefecimento no Verão de sistemas enterrados sob o clima da Europa Central. O modelo da simulação do permutador de calor ar-solo usado tem em conta a transferência de calor sensível e latente. O modelo também considera as perdas por atrito, infiltração e fluxo de água ao longo dos tubos. Permite ainda o controlo do sentido do fluxo de ar assim como uma geometria flexível (solos não homogêneos, condições limite diversas, uso de simetrias ou padrões de repetição para economia de tempo de cálculo) e está adaptado ao TRNSYS. As equações básicas do modelo descrevem as trocas de massa e de energia entre o ar e o tubo.

Pfafferott [41] apresenta um artigo que trata do comportamento dinâmico da temperatura e desempenho energético de três permutadores de calor ar-solo para edifícios de escritórios situados na Alemanha.

O desempenho térmico dos permutadores é calculado usando quatro abordagens diferentes. Conclui-se que a avaliação de um permutador depende dos critérios específicos de projecto. Prova-se que cada um dos permutadores avaliados é o melhor de algum ponto da vista. No primeiro a temperatura de saída do ar é próxima da temperatura do solo não perturbado. O segundo fornece um ganho de energia específico mais elevado, baseado na área superficial total. E o terceiro tem o coeficiente de desempenho (COP) mais elevado.

De Paepe e Janssens [27] usaram um método analítico unidimensional para examinar a influência dos parâmetros de projecto do permutador de calor no desempenho termo-hidráulico e criaram um método de projecto gráfico fácil que determina dimensões características do permutador de calor ar-solo de tal maneira que a eficácia térmica óptima é alcançada com uma perda de pressão aceitável. Consequentemente, a escolha das dimensões características é independente do solo e das circunstâncias climatológicas. Isto permite que os projectistas escolham a configuração do permutador de calor com o melhor desempenho.

Esta análise tem em conta o caudal mássico de ar, a temperatura do ar à entrada, a temperatura desejada do ar à saída, a temperatura do solo e os parâmetros geométricos de dimensionamento que são o diâmetro do tubo, o comprimento do tubo e o número dos tubos.

Durante a revisão bibliográfica verificou-se que existem grupos de trabalho que estudam este assunto há vários anos, propondo e comparando modelos com dados reais. Os modelos propostos são muitos, com diferentes abordagens e vários níveis de complexidade. No entanto os modelos simples aproximam-se da realidade com um erro aceitável para o presente trabalho.

2.5 Programas de cálculo existentes

Existem alguns programas de dimensionamento de permutadores de calor ar-solo. O sistema do edifício Solar XXI do INETI foi dimensionado com a ajuda do programa Summer [42]. No entanto não se encontrou este programa disponível na *internet*.

É possível descarregar uma versão de demonstração do programa GAEA (*Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern* – Desenho gráfico de permutadores de calor) com opção de língua entre inglês e alemão [29]. Nesta ferramenta foram utilizadas equações simples de transferência de calor com soluções analíticas. A *interface* com o utilizador é bastante simples, encontrando-se previamente preenchida com valores típicos que poderão ser alterados. Tem várias janelas para introduzir valores do sistema de tubos, do clima, do solo e de dados de economia. O GAEA tem um processo de optimização automatizada, apresentando uma variedade de possíveis soluções e respectivos valores de energia e custos [30,31]. Este programa foi criado na Universidade de Siegen, na Alemanha. A versão de demonstração tem um tempo limitado e a informação disponível sobre este programa encontra-se maioritariamente em alemão o que dificultou a sua análise.

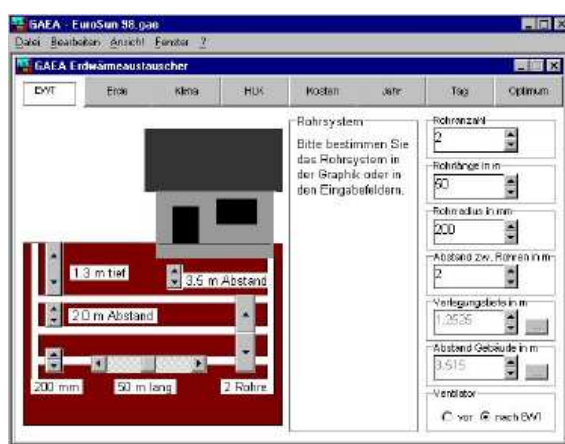


Figura 2.15 – Aspecto de uma janela de introdução de dados do programa GAEA [29].

O ClimaSolo é um programa desenvolvido pela Universidade de Aveiro, que a partir dos dados climáticos, do solo, do sistema e do local a climatizar, calcula o

número de tubos e a distância necessária entre eles. A *interface* com o utilizador é simples, sendo feita a partir de um ficheiro de Excel [32].

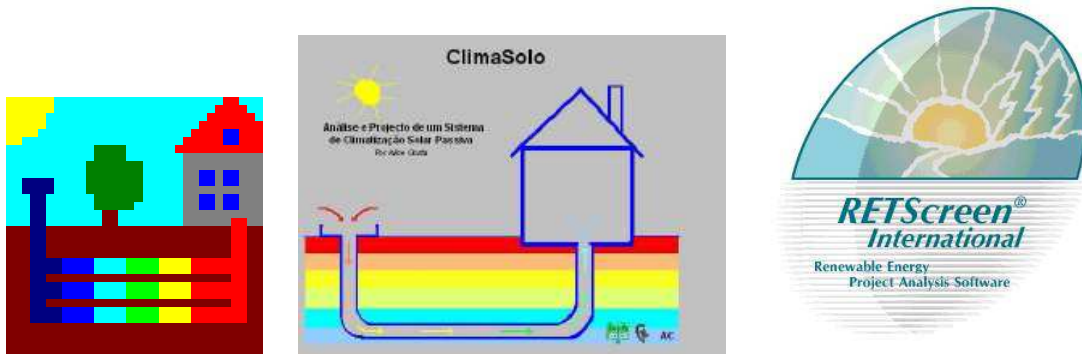


Figura 2.16 – Logotipos dos programas GAEA, ClimaSolo e RETScreen [29,32,33].

O RETScreen International é um programa de análise de projectos de energias renováveis, que funciona numa base de Excel. Foi criado pelo Governo Canadiano. Pode ser usado em todo o mundo para avaliar a produção de energia, os custos do ciclo de vida e a redução das emissões de gases com efeito de estufa. Está disponível de forma gratuita. É constituído por vários módulos independentes, entre os quais energia eólica, fotovoltaica, biomassa e bombas de calor geotérmicas (GSHP). Contudo não existe um módulo de permutadores de calor ar-solo. Uma vez que este programa tem mais de 69000 utilizadores, espalhados por 210 países, pensou-se que seria interessante desenvolver um novo módulo, que desta maneira seria facilmente difundido [33].

3 Modelos físico-matemáticos

3.1 Modelos de temperaturas

De forma a se poder prever a temperatura a que sairá o ar depois de atravessar um sistema de tubos enterrados, usam-se três modelos de simulação:

- 1-modelo de temperatura do ar exterior;
- 2-modelo de temperatura do solo e
- 3-modelo de transferência de calor no tubo.

As variáveis de entrada e resultados de cada modelo estão apresentados no fluxograma da Figura 3.1, seguindo-se uma explicação detalhada de cada modelo.

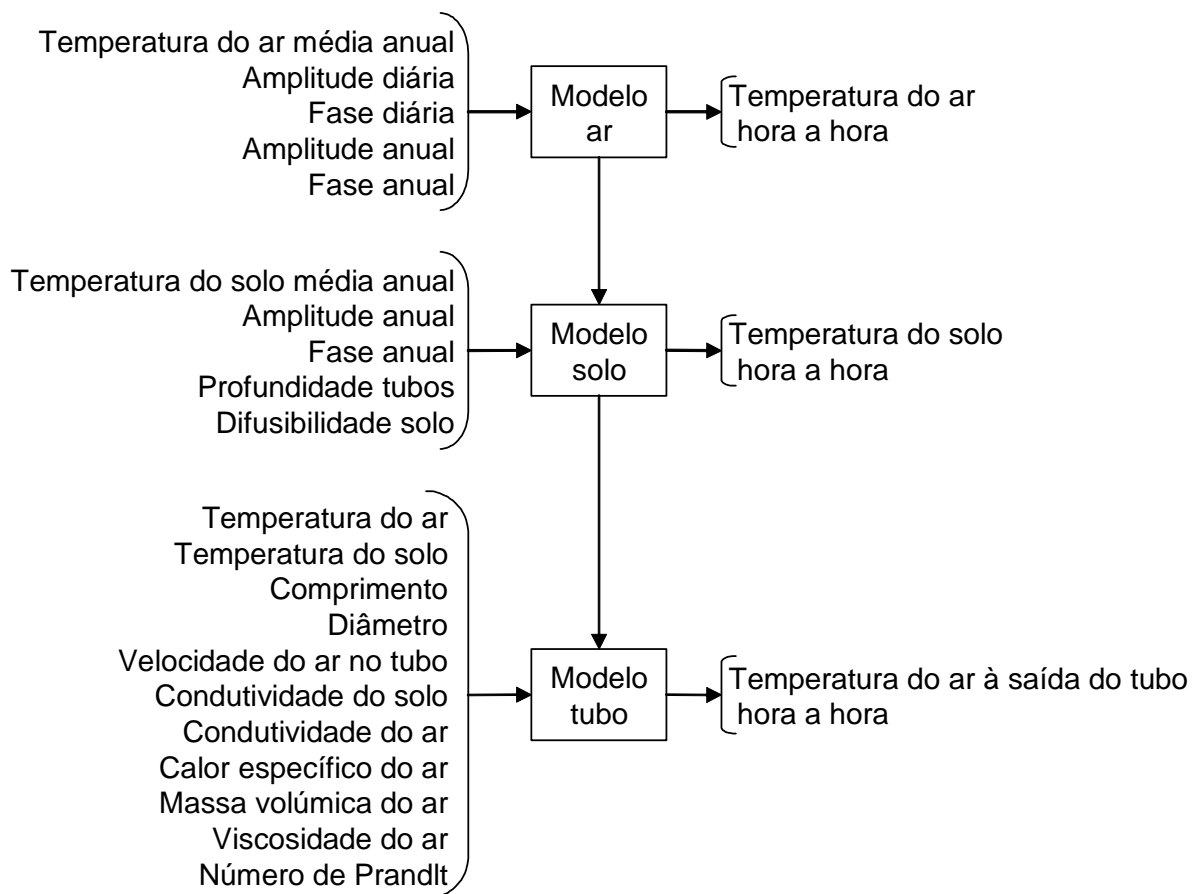


Figura 3.1 – Fluxograma dos modelos de temperatura.

3.1.1 Modelo de temperatura do ar exterior

O primeiro modelo a ser utilizado é o de simulação da temperatura do ar exterior. Para este algoritmo era necessário um modelo simples, intuitivo, com variáveis de entrada que estivessem disponíveis para todo o mundo e que permitisse a sua utilização em Excel com rapidez de cálculo. O modelo escolhido foi o apresentado em [43] com a seguinte expressão:

$$T_{ar}(t,0) = \bar{T}_{ar,anual} + Amp_{ar,diária} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{24}(t - fase_{diária})\right) + Amp_{ar,anual} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{8760}(t - fase_{anual})\right) \quad (1)$$

em que:

$$Amp = \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad (2)$$

Este modelo simula as variações de temperatura diária e anual representando-as como a soma da temperatura média anual a duas sinusóides, uma com período de 24 horas, equivalente a um dia, e outra de 8760 horas, o que corresponde a um ano. A fase diária ajusta o tempo à hora mais quente do dia e a fase anual ajusta-o à hora mais quente do ano.

Introduziram-se no modelo valores calculados a partir dos dados horários reais do ano 2001 da Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro. A temperatura média é o resultado da média de todos os valores horários ao longo do ano. A amplitude diária usada é a média das 365 amplitudes diárias, calculadas com os valores horários de temperatura máxima e mínima de cada dia. A amplitude anual foi calculada com as temperaturas horárias máxima e mínima do ano. O resultado teórico devia ajustar-se aos dados reais, uma vez que foi calculado a partir destes, contudo são visualmente muito diferentes, como pode ser observado na Figura 3.2.

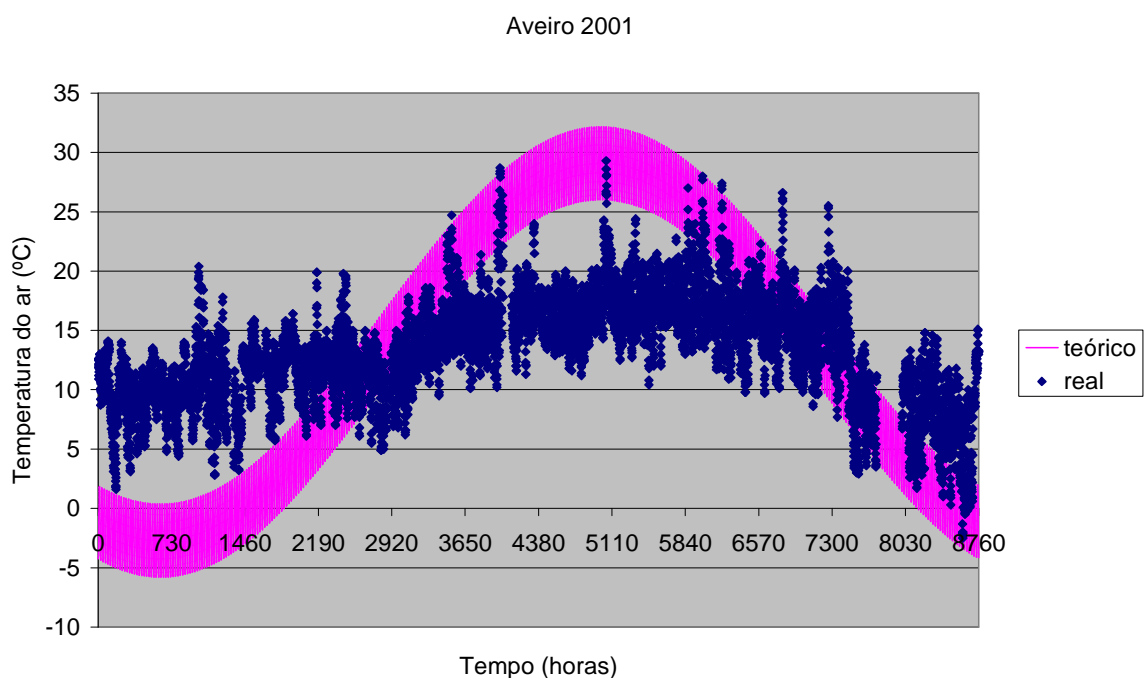


Figura 3.2 – Gráfico da temperatura do ar ao longo do ano de 2001 medida na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando temperaturas máxima e mínima horárias para o cálculo da amplitude anual (teórico).

Concluiu-se que, neste modelo, a amplitude anual não pode ser calculada com as temperaturas horárias máxima e mínima do ano, como havia sido feito. Experimentou-se então calcular a amplitude anual com outros valores. Foram utilizadas:

- máxima e mínima das médias diárias,
- máxima e mínima das médias semanais e
- máxima e mínima das médias mensais.

Optou-se por utilizar esta última forma uma vez que foi a que melhor se adaptou visualmente aos dados reais (ver Figura 3.3) e tem a vantagem das médias mensais de vários anos estarem disponíveis para todo o mundo no site da NASA [44].

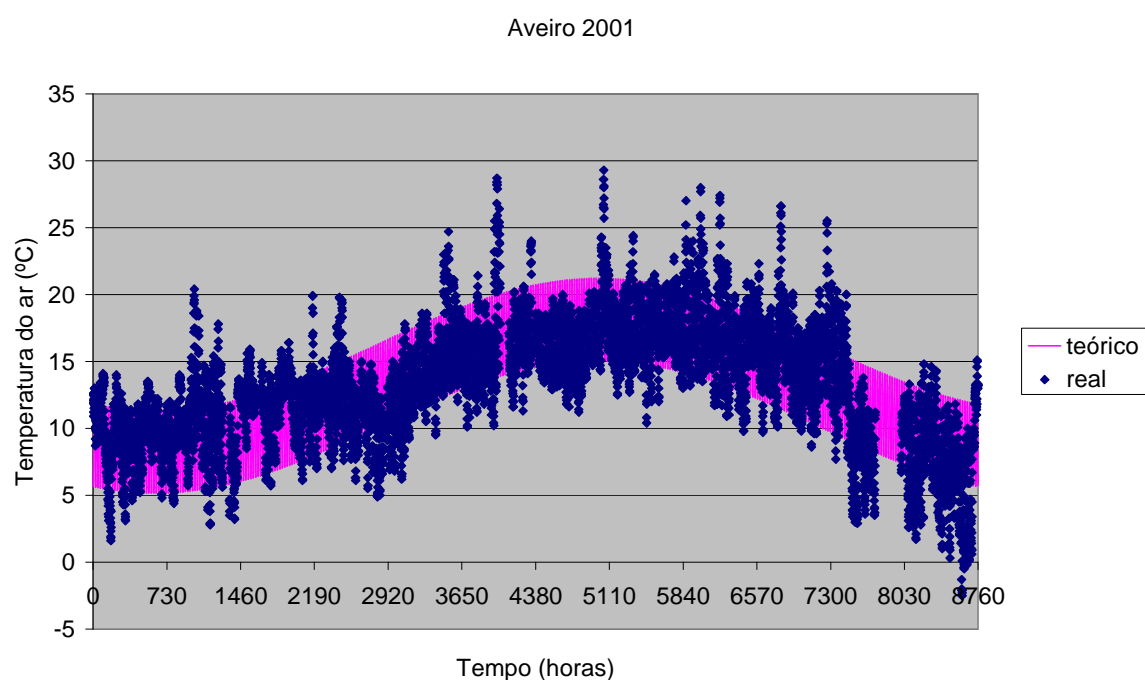


Figura 3.3 – Gráfico da temperatura do ar ao longo do ano de 2001 medida na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando temperaturas máxima e mínima das médias mensais para o cálculo da amplitude anual (teórico).

Até aqui a amplitude térmica diária foi calculada usando as temperaturas máxima e mínima diárias. Contudo, esta informação não está disponível na página da NASA. Portanto, para a construção do gráfico utilizando apenas os dados disponibilizados nesta página, teve de ser usado o valor da diferença diária do mês mais quente (*Average Summer daily temperature range*). A amplitude diária foi assim considerada como sendo metade do *range*. Usando latitude $+40^{\circ}$ (Norte) e longitude -9° (Oeste), para Aveiro, o resultado obtido com os valores disponíveis pode ser visto na Figura 3.4. Este resultado foi aceite, embora se note que a amplitude diária é superior à real. Na Figura 3.5 pode ver-se um pormenor do gráfico anterior, correspondente à primeira semana de Janeiro. Apesar de dia-a-dia os valores calculados se afastarem dos reais, para o período de toda a semana o intervalo de temperaturas de ambos é semelhante. Neste gráfico destaca-se a sinusóide de período diário ao contrário dos gráficos anteriores onde maioritariamente se vê a sinusóide com período anual.

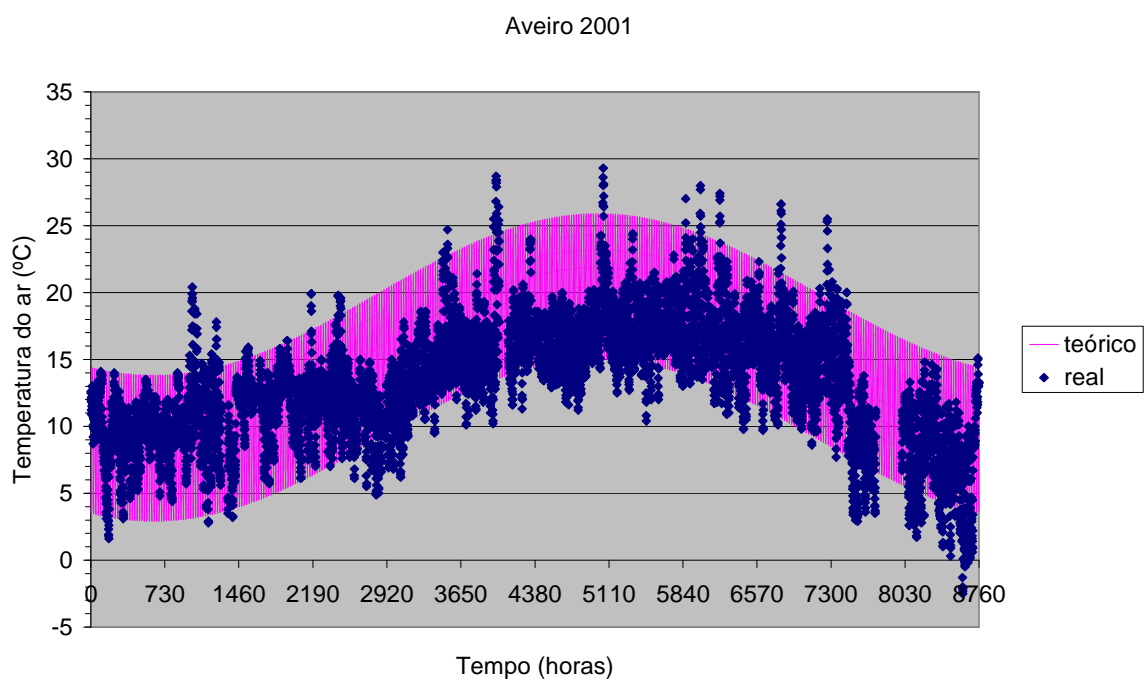


Figura 3.4 – Gráfico da temperatura do ar ao longo do ano de 2001 medida na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando valores da NASA (teórico).

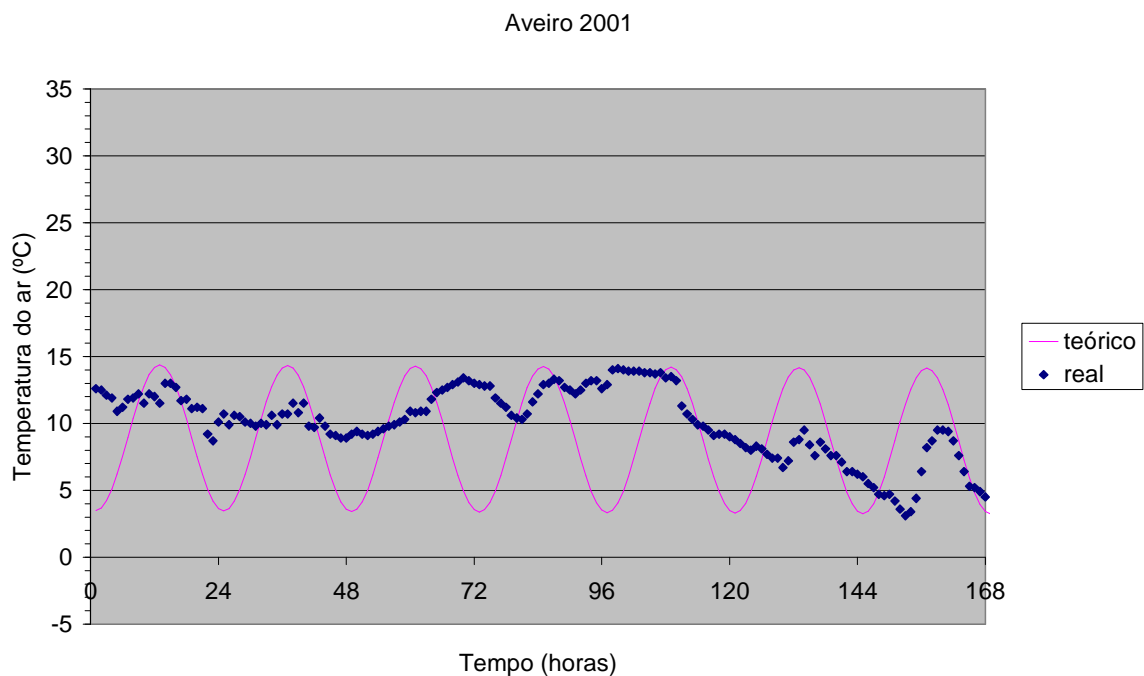


Figura 3.5 – Gráfico da temperatura do ar durante a primeira semana de 2001 medida na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando valores da NASA (teórico)

3.1.2 Modelo de temperatura do solo

O segundo modelo calcula a temperatura do solo não perturbado a uma determinada profundidade. Como o modelo anterior, era necessário que este fosse simples, intuitivo, com variáveis de entrada que estivessem disponíveis para todo o mundo e que permitisse a sua utilização em Excel com rapidez de cálculo. A equação escolhida foi encontrada em [6,24,33,46,47]:

$$T_{solo}(t, z) = \bar{T}_{anual} + Amp_{anual} \cdot \exp\left(-z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha 8760}}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi(t - fase_{anual})}{8760} - z \sqrt{\frac{\pi}{\alpha 8760}}\right) \quad (3)$$

Partindo da temperatura média anual à superfície, a amplitude é atenuada e desfasada de acordo com a profundidade e as características do solo. O resultado é uma sinusóide simples ao longo do ano, uma vez que a variação diária não é tida em conta, por ser muito atenuada em profundidade. Este modelo considera a condução de calor no solo como num sólido homogéneo.

De acordo com [47] a precisão das previsões da temperatura não perturbada do solo é muito sensível aos valores dos parâmetros de entrada. Contudo quando os valores são calculados a partir de dados reais, o modelo geralmente apresenta erros não superiores a 1,1°C.

O tipo de solo pode variar muito num curto espaço, pelo que não existem valores disponíveis para a sua difusibilidade à escala mundial. Existem cartas de solo de onde se pode retirar informação sobre o tipo de solo de uma determinada zona e por esta razão na folha de Início do ficheiro criado não se pede ao utilizador para introduzir a difusibilidade, mas sim o tipo de solo. Os valores de difusibilidade posteriormente usados para cada tipo de solo são iguais aos utilizados no módulo de GSHP do RETScreen. Uma vez que não se teve acesso à difusibilidade real do solo na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro, testaram-se visualmente vários valores teóricos, tendo sido escolhido e utilizado nos cálculos seguintes o valor 0,0015 m²/h.

Enquanto que os autores de [5,47] concordam em usar a temperatura média do ar como equivalente à média do solo, em [24] outros usam a temperatura do solo à superfície e em [46] a temperatura em profundidade. No artigo [48] alerta para o facto da utilização de valores do ar no modelo do solo apresentar resultados em média 2°C inferiores aos reais. Contudo, por ser mais fácil, inicialmente considerou-se a primeira hipótese e foi usada a temperatura média e a amplitude do ar já calculada para o modelo anterior. No entanto, os resultados não correspondem com proximidade à realidade como se pode ver na Figura 3.6. Verifica-se aqui que o gráfico cor-de-rosa varia menos que o azul, pois a amplitude calculada numa base mensal para o modelo do ar não é a adequada para este modelo.

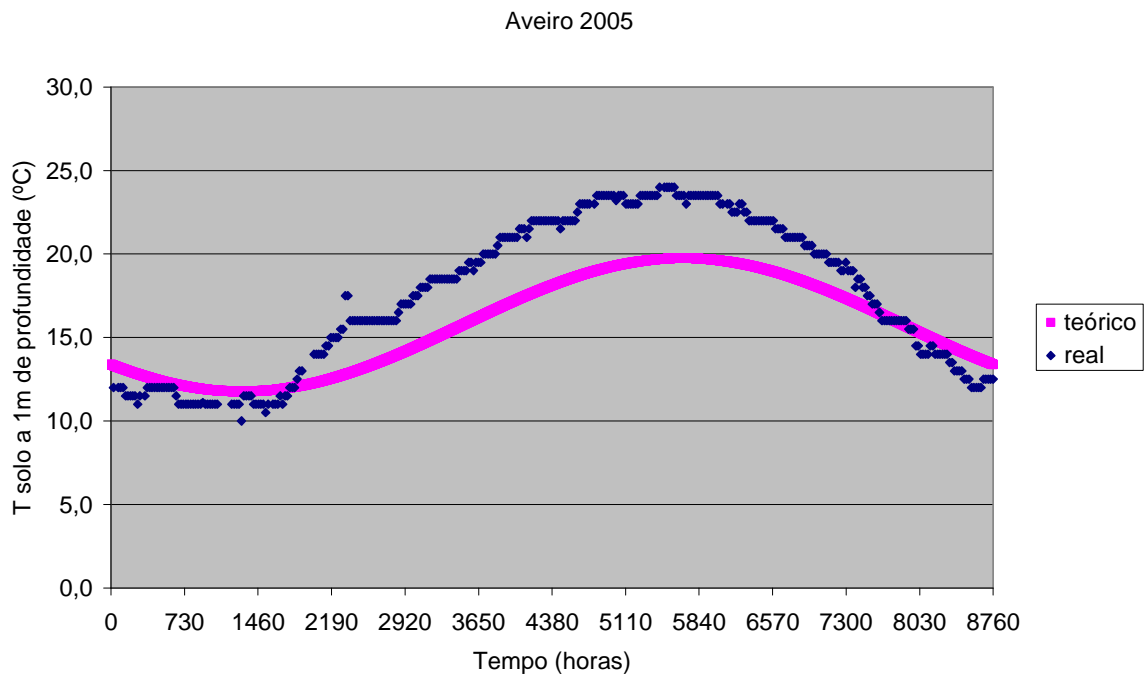


Figura 3.6 – Gráfico da temperatura do solo medida a 1m de profundidade, ao longo do ano de 2005, na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando temperatura média e amplitude anual do solo iguais às do ar (teórico).

Posteriormente, a temperatura média do solo foi calculada como sendo a média de todos os valores reais disponíveis e a amplitude foi calculada com as temperaturas diárias máxima e mínima do ano, a 5 cm de profundidade (considerado superfície). Utilizando então estes valores obtidos através das temperaturas reais do solo, o resultado foi bastante melhor (ver Figura 3.7).

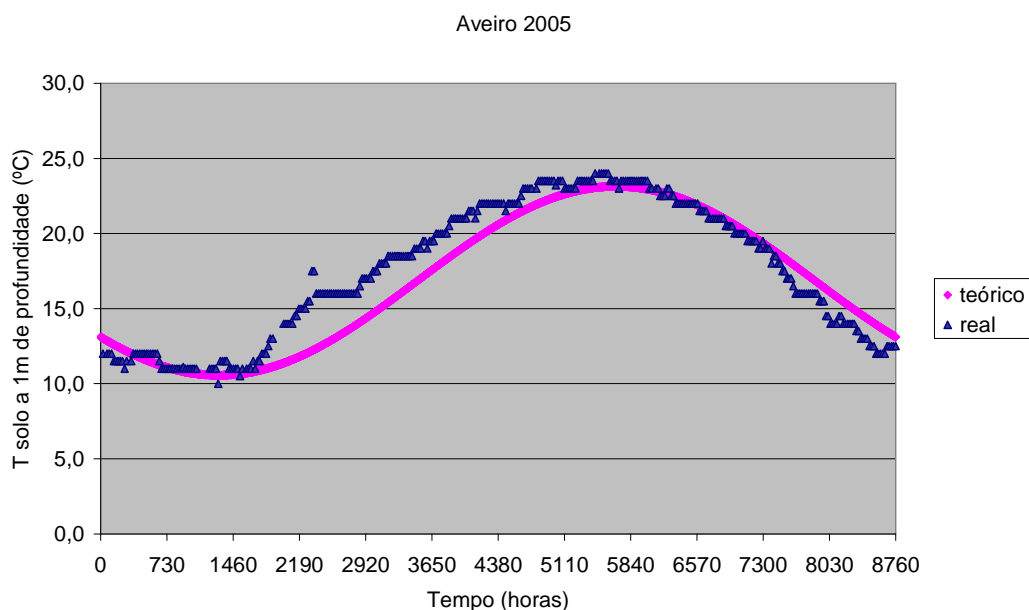


Figura 3.7 – Gráfico da temperatura do solo medida a 1m de profundidade, ao longo do ano de 2005, na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando dados reais do solo (teórico).

Utilizando os valores da NASA para o solo (ver Figura 3.8), verificou-se que a média é mais baixa do que a real, o que pode ser devido a 2005 ter sido um ano muito quente, enquanto que os dados da NASA são médias de vários anos.

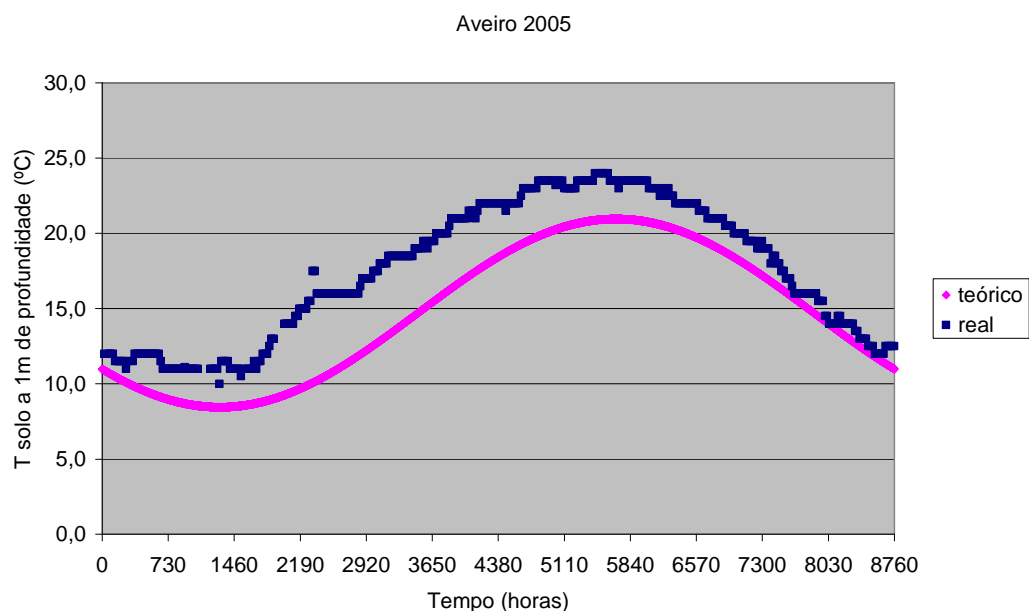


Figura 3.8 – Gráfico da temperatura do solo medida a 1m de profundidade, ao longo do ano de 2005, na Estação Meteorológica da Universidade de Aveiro (real) e calculada com o modelo usando dados da NASA (teórico).

3.1.3 Modelo de transferência de calor no tubo

O terceiro modelo é usado para obter a temperatura do ar à saída de um permutador de calor ar-solo e utiliza a seguinte expressão:

$$T_{ar}(t, x) = T_{solo}(t, z) + (T_{ar}(t, 0) - T_{solo}(t, z)) \cdot \exp(-NUT) \quad (4)$$

Este modelo tem como dados de entrada os resultantes dos dois modelos anteriores, as características do tubo e do escoamento. Foram apresentados modelos deste tipo em [27,41,47,49,50,51]. A maioria calcula NUT segundo a equação:

$$NUT = \frac{h \cdot A_{contacto}}{\dot{m} \cdot cp_{ar}} \quad (5)$$

em que:

$$h = \frac{Nu \cdot k_{ar}}{D} \quad (6)$$

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^n \quad (7)$$

$n=0,4$ para aquecimento e $n=0,3$ para arrefecimento

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (8)$$

No entanto a equação usada em [47] tem em conta a resistência do solo circundante ao tubo. Sendo o NUT calculado do seguinte modo:

$$NUT = \frac{U}{\dot{m} \cdot cp_{ar}} \quad (9)$$

em que:

$$U = \frac{1}{R_s + R_c} \quad (10)$$

$$R_s = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k} \quad (11)$$

$$R_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot h} \quad (12)$$

sendo h calculado usando a eq. (6).

Ao modelo que utiliza a equação (5) chamou-se modelo teórico 1 e ao que usa a equação (9) modelo teórico 2.

De forma a comparar os resultados dos modelos com a realidade são necessários dados reais horários de temperatura do ar ambiente, do solo e à saída do tubo ao longo de um ano, além das características do permutador. Da pesquisa efectuada, o artigo [41] foi o único onde estão disponíveis todos estes dados. No entanto, as temperaturas ao longo do ano encontram-se em formato gráfico dificultando a sua utilização. Houve uma tentativa de contacto com o autor do artigo que ficou sem resposta. Teve então de se converter os dados gráficos para dados numéricos, utilizando o programa Engauge Digitizer 2.12. Deste modo perdeu-se algum rigor nos dados, mas obtiveram-se gráficos em Excel que posteriormente puderam ser comparados com valores teóricos.

Calcularam-se os valores de temperatura do ar ambiente, do solo e do ar à saída do permutador de calor ar-solo com base em valores médios da NASA para latitude 51°N e longitude 10°E, correspondente a uma área na Alemanha que abrange o local do edifício Lamparter referido no artigo [41]. Na Figura 3.9 pode ver-se que da utilização do modelo de temperatura do ar resultam valores aproximados aos reais, enquanto que os resultados do modelo de temperatura do

solo se afastam dos reais na primeira metade do ano, pois a temperatura média da NASA é inferior à real e a amplitude é superior. Na Figura 3.10, ao comparar os resultados teóricos da temperatura à saída com valores reais obtidos em [41], verifica-se que, tal como no modelo do solo, não se aproximam muito no início do ano, mas no final são mais parecidos.

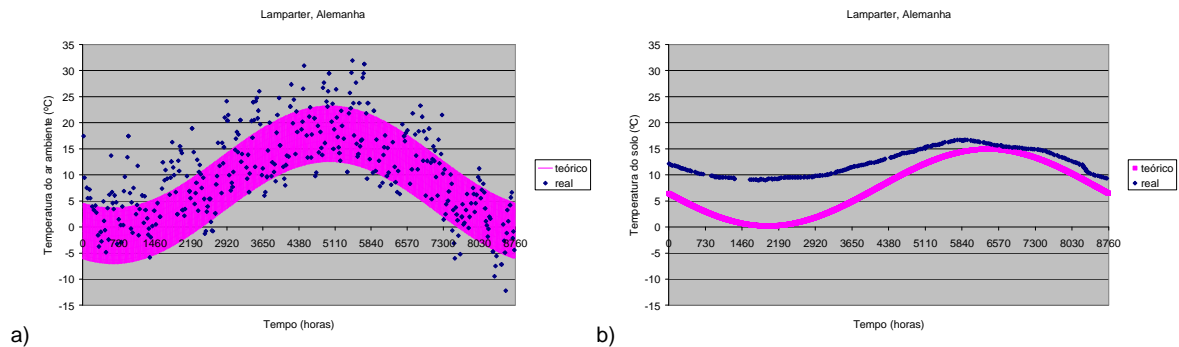


Figura 3.9 – Gráficos das temperaturas de ar ambiente (a) e do solo (b), ao longo de um ano, medidas no edifício Lamparter em Weilheim na Alemanha (real) e calculadas com os modelos usando dados da NASA (teórico).

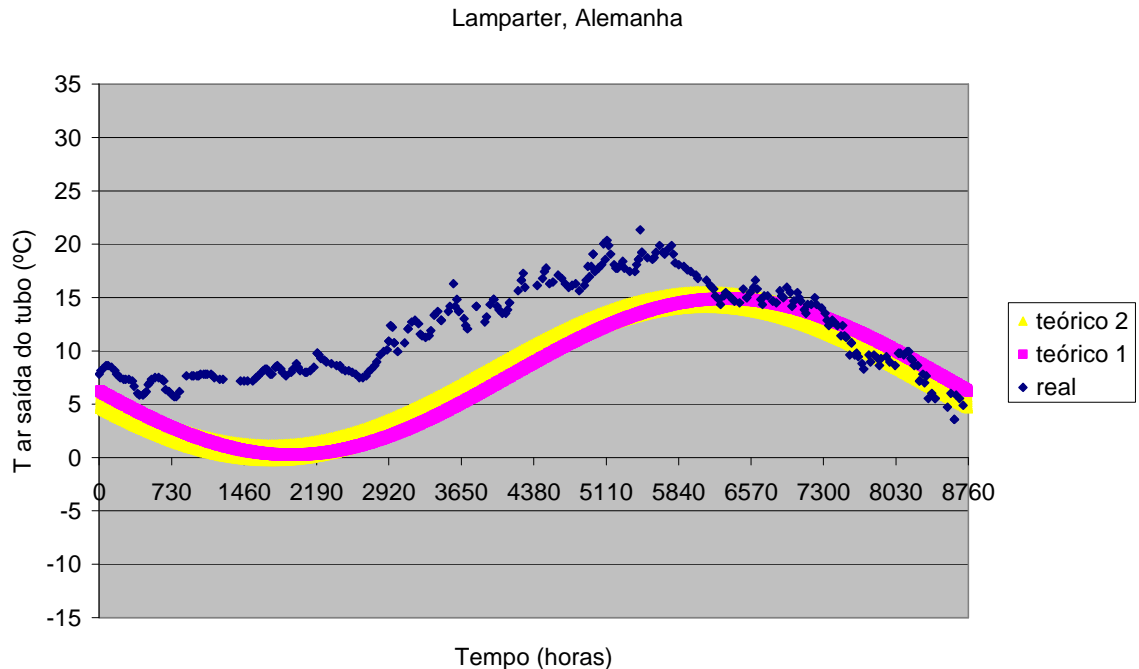


Figura 3.10 – Gráfico da temperatura do ar medida à saída do permutador do edifício Lamparter em Weilheim na Alemanha (real) e calculada com os modelos teóricos 1 e 2 usando dados da NASA.

Com os cálculos anteriores, embora se possa observar que o modelo teórico 2 tem uma amplitude diária superior ao modelo 1, não se conseguiu concluir qual dos modelos melhor se adapta à realidade.

Como em todos os modelos, quanto melhor a informação fornecida, melhores são os resultados. Utilizaram-se então como dados de entrada valores de temperatura do ar e do solo reais, obtidos na urbanização AlmaVerde no Algarve, para o cálculo da temperatura do ar à saída do permutador de calor ar-solo. Verifica-se na Figura 3.11 que a maior amplitude diária corresponde à realidade, acompanhando o modelo 2 muito mais de perto os dados reais que o modelo 1. Sendo assim, no algoritmo desenvolvido neste trabalho foi utilizado o modelo 2.

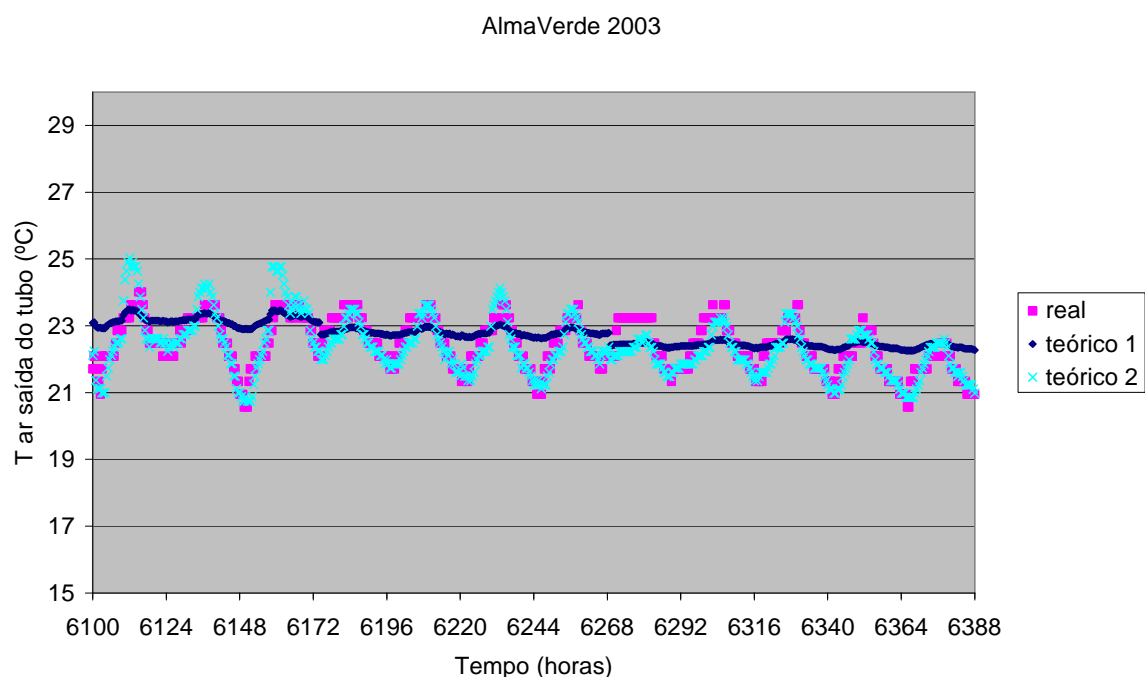


Figura 3.11 – Gráfico da temperatura do ar medida à saída de um permutador da urbanização AlmaVerde no Algarve (real) e calculada através dos modelos teórico 1 e 2, usando valores reais de temperatura do ar e do solo como dados de entrada.

3.2 Modelo de cargas térmicas

Considerou-se que as cargas que fazem aumentar a temperatura do ar são positivas e as que reduzem a sua temperatura são negativas.

3.2.1 Carga do permutador de calor ar-solo

A carga térmica que é possível fornecer com os tubos resulta da quantidade de ar que passa através destes e da diferença de temperatura entre a massa de ar à entrada e à saída do tubo, de acordo com as equações seguintes:

$$q_{\text{permutador}} = q_{1\text{tubo}} \cdot nt \quad (13)$$

$$q_{1\text{tubo}} = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_{\text{tubo}} - T_{\text{ar}}) \quad (14)$$

em que:

$$\dot{m} = \dot{v} \cdot \rho_{\text{ar}} \quad (15)$$

$$\dot{v} = A_{\text{entrada}} \cdot v \quad (16)$$

$$A_{\text{entrada}} = \pi \cdot r^2 \quad (17)$$

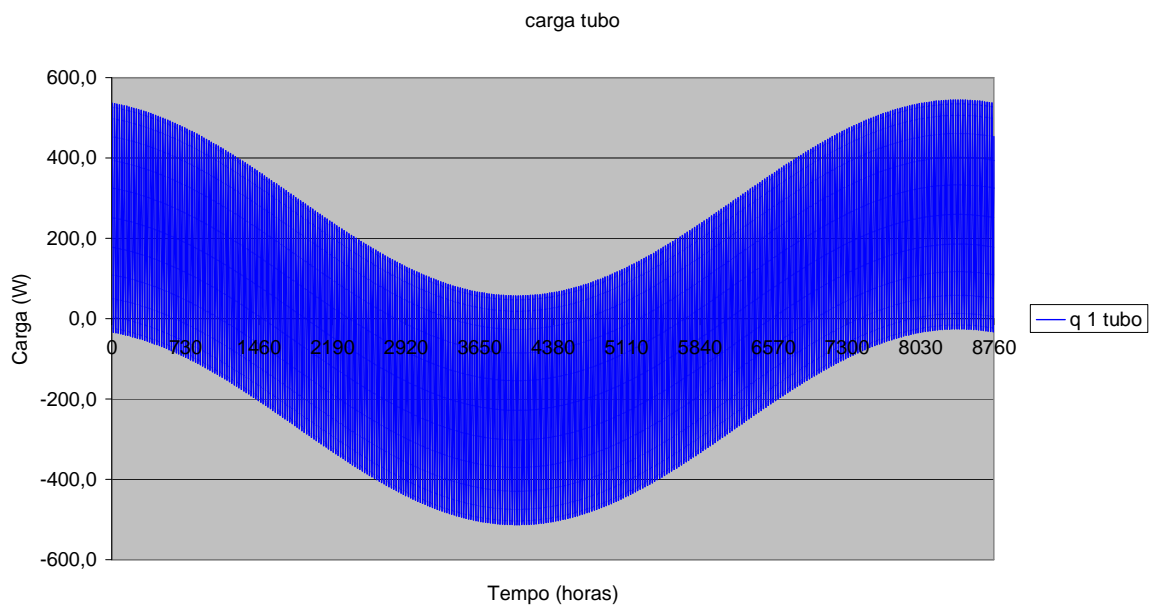


Figura 3.12 – Carga que é possível fornecer com um tubo ao longo de um ano em Aveiro.

4 Implementação do algoritmo

4.1 Introdução

O objectivo principal deste trabalho foi criar uma ferramenta simples, de aprendizagem fácil para construtores, arquitectos e engenheiros de todo o mundo, de forma a que estes incluam permutadores de calor ar-solo nos edifícios pelos quais são responsáveis, e com resultados rápidos, mesmo que isso compromettesse algum rigor que é desnecessário numa fase de análise da pré-viabilidade.

O algoritmo apresentado nesta dissertação foi implementado em Excel e teve inspiração nos módulos do RETScreen. Por serem estes programas muito difundidos a nível mundial, espera-se que o algoritmo aqui proposto seja mais facilmente compreendido e utilizado.

O ficheiro criado divide-se em quatro folhas principais de acordo com o fluxograma da Figura 4.1. As folhas de “Início”, “Análise de custos” e “Síntese financeira” estão vocacionadas para a introdução de dados e apresentação de resultados ao utilizador. A folha “Modelos” é onde são realizados os cálculos principais usando os modelos de simulação de temperaturas e cargas térmicas apresentados no capítulo anterior. No entanto não é necessário que o utilizador tenha acesso a esta folha, pois não são introduzidos dados nem apresentados resultados aqui. O ficheiro inclui outras folhas com gráficos de temperaturas e cargas do tubo que facilitam a compreensão das diferentes situações térmicas ao longo do ano.

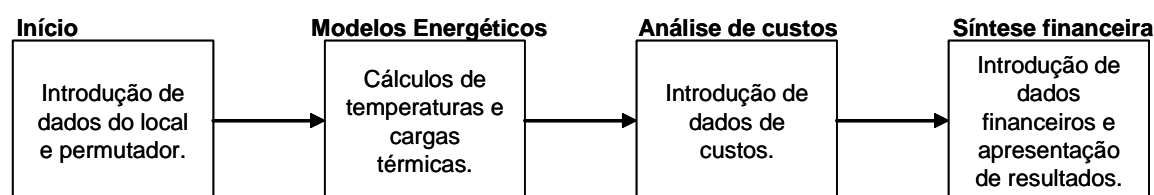


Figura 4.1 – Fluxograma geral do algoritmo desenvolvido.

4.2 Introdução de dados

As células do ficheiro estão codificadas com cores. As células com fundo branco são próprias do programa e não devem ser alteradas pelo utilizador. As células preenchidas a amarelo são específicas para o utilizador introduzir dados que vão ser utilizados para os cálculos. Com o fundo cinzento apresentam-se células que são para preenchimento pelo utilizador, mas que não interferem nos cálculos.

Na folha de “Início” o utilizador tem de introduzir os dados referentes ao local (ar, solo, insolação) e ao permutador. Os dados necessários são os apresentados com fundo amarelo na Figura 4.2.

Alguns dos dados referentes ao local, podem ser conseguidos através da página da NASA [44], para uma determinada latitude e longitude. O valor da radiação solar a usar nas equações é o da radiação incidente no plano das janelas (considerou-se o plano vertical). Na página da NASA apenas existem valores de radiação no plano horizontal. Contudo é possível converter estes nos valores necessários através do módulo *Solar Water Heating* do RETScreen. As horas de nascer e pôr-do-Sol podem ser calculadas na página da NOAA [45].

Os valores a introduzir em relação ao permutador são da livre escolha do utilizador. No entanto, tendo por base a bibliografia consultada, recomendam-se como valores iniciais para o permutador:

- comprimento de cada tubo 20 m
- diâmetro de cada tubo 0,2 m
- profundidade 2 m
- velocidade do ar 4 m/s

No final, é apresentada a energia poupada por ano em aquecimento e arrefecimento que foi entretanto calculada na folha de “Modelos”.

Permutadores de Calor Ar-Solo - Início			
			Identificação do projecto AVEIRO
Ar ambiente			
Tmédia anual	°C	14,4	
Amplitude anual	°C	6,04	
Fase anual	data	1-Ago	
Amplitude diária	°C	5,45	
Fase diária	horas	15	
Solo			
Tmédia anual	°C	14,7	
Amplitude anual	°C	10,2	
tipo de solo		Solo arenoso húmido	
difusibilidade	m2/h	0,0019	
Sol			
		Radiação sup vertical (kWh/(m2dia)	Hora do Nascer do Sol
			Hora do Pôr do Sol
Estes dados poderão ser obtidos em:	jan	2,07	7:52
	fev	2,55	7:26
	mar	3,36	6:44
	abr	3,70	5:55
	mai	3,93	5:17
	jun	4,02	5:03
	jul	4,10	5:15
	ago	4,17	5:43
	set	3,79	6:12
	out	2,94	6:42
	nov	2,11	7:17
	dez	1,87	7:46
Permutador			
comprimento de cada tubo	m	20	
diâmetro de cada tubo	m	0,2	
profundidade	m	2	
velocidade do ar	m/s	4,00	
rendimento do ventilador	%	80%	
Conforto			
T conforto Inverno	°C	20	
T conforto Verão	°C	25	
COP sistema aquecimento comparação		3,5	
COP sistema arrefecimento comparação		2,5	
Energia			
energia poupada em aquecimento	kWh th/ano	895	por tubo
energia poupada em arrefecimento	kWh th/ano	164	por tubo
energia poupada em aquecimento	kWh elect/ano	256	por tubo
energia poupada em arrefecimento	kWh elect/ano	65	por tubo
energia gasta em aquecimento	kWh elect/ano	1,8	por tubo
energia gasta em arrefecimento	kWh elect/ano	0,4	por tubo
COP aquecimento		487	
COP arrefecimento		378	
Passar para a Análise de custos			

Figura 4.2 – Aspecto da folha “Início”.

Na folha de “Início”, fora da zona destinada ao utilizador, são ainda feitos alguns cálculos intermédios de forma a facilitar as fórmulas da folha “Modelos”.

4.3 Cálculos energéticos

Os cálculos energéticos são realizados na folha “Modelos”.

dia/mês	hora	T _{ar}	T _{solo}	T _{tubo}	T _{rt med}	W _{dia/noit}	I W/m2	T _{ar-Sol}	r-Sol med	T conforto	q 1 tubo	q útil 1 tubo	q 2 tubo
01-Jan	1	1	4,4	14,0	7,7	207,2	0,0	0,0	4,4	10,7	20,0	498,0	498,0
	2	2	3,9	14,0	7,4	207,2	0,0	0,0	3,9	10,7	20,0	526,4	526,4
	3	3	3,7	14,0	7,2	207,2	0,0	0,0	3,7	10,7	20,0	536,0	536,0
	4	4	3,9	14,0	7,3	207,2	0,0	0,0	3,9	10,7	20,0	526,3	526,3
	5	5	4,4	14,0	7,7	207,2	0,0	0,0	4,4	10,7	20,0	497,8	497,8
	6	6	5,3	13,9	8,3	207,2	0,0	0,0	5,3	10,7	20,0	452,5	452,5
	7	7	6,4	13,9	9,0	207,2	0,0	0,0	6,4	10,7	20,0	393,5	393,5
	8	8	7,7	13,9	9,9	207,2	0,0	0,0	7,7	10,7	20,0	324,8	324,8
	9	9	9,1	13,9	10,8	207,2	1,0	207,2	12,9	10,7	20,0	251,1	251,1
	10	10	10,5	13,9	11,7	207,2	1,0	207,2	14,3	10,7	20,0	177,3	177,3
	11	11	11,9	13,9	12,6	207,2	1,0	207,2	15,6	10,7	20,0	108,6	108,6
	12	12	13,0	13,9	13,3	207,2	1,0	207,2	16,7	10,7	20,0	49,6	49,6
	13	13	13,8	13,9	13,9	207,2	1,0	207,2	17,6	10,7	20,0	4,3	4,3
	14	14	14,4	13,9	14,2	207,2	1,0	207,2	18,1	10,7	20,0	-24,2	0,0
	15	15	14,6	13,9	14,3	207,2	1,0	207,2	18,3	10,7	20,0	-33,9	0,0

Figura 4.3 – Aspecto da folha “Modelos”.

Para facilitar a compreensão dos valores calculados, existe uma coluna com o dia e mês, outra com as horas ao longo do ano e outra com as horas do dia.

Inicialmente são calculadas as temperaturas do ar, do solo e do ar à saída do tubo, hora a hora, de acordo com os modelos apresentados no capítulo anterior.

Seguidamente, calcula-se a radiação média num plano vertical, para cada hora, de acordo com o mês e se é dia ou noite. Estes valores servem para calcular a cada hora a temperatura ar-Sol segundo a equação:

$$T_{ar-Sol} = T_{ar} + \frac{\beta \cdot I}{h_e} \quad (18)$$

em que:

- T_{ar} temperatura do ar ambiente
- β coeficiente de absorção (para a radiação solar) da superfície exterior da parede, toma o valor 0,45 para parede de cor clara/média.
- I intensidade de radiação solar instantânea incidente
- h_e condutância térmica superficial exterior do elemento da envolvente, que toma o valor de $25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Consoante a temperatura ar-Sol média do dia for inferior ou superior a 20°C, corresponde à estação de aquecimento ou de arrefecimento e apresenta-se a respectiva temperatura de conforto.

Depois é calculada a carga térmica que cada tubo pode fornecer de acordo com a equação $q_{\text{tubo}} = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_{\text{tubo}} - T_{\text{ar}})$ (14).

Na última coluna é calculada a carga útil segundo a equação:

$$q_{\text{útil permutador}} = \begin{cases} \text{Se } T_{\text{mín conforto}} < T_{\text{ar}} < T_{\text{máx conforto}}, = 0 \\ \text{Se } (T_{\text{conforto}} = T_{\text{mín conforto}} \text{ e } q_{\text{tubo}} > 0), = q_{\text{tubo}} \\ \text{Se } (T_{\text{conforto}} = T_{\text{máx conforto}} \text{ e } q_{\text{tubo}} < 0), = q_{\text{tubo}} \\ \text{Se outros casos} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

Estes valores são utilizados para calcular a energia poupada em aquecimento e em arrefecimento, que é apresentada na folha “Início”.

$$E_{\text{aquecimento}} = \sum (q_{\text{útil permutador}} \cdot t), \text{ se } q_{\text{útil permutador}} > 0 \quad (20)$$

$$E_{\text{arrefecimento}} = -\sum (q_{\text{útil permutador}} \cdot t), \text{ se } q_{\text{útil permutador}} < 0 \quad (21)$$

Este valor de energia térmica é convertido em energia eléctrica através do rendimento do sistema de comparação introduzido pelo utilizador.

$$COP = \frac{E_{\text{térmica}}}{E_{\text{eléctrica}}} \quad (22)$$

4.4 Bases de dados residentes

Nas equações utilizadas no ficheiro de Excel foram introduzidos alguns valores que podem causar dúvidas aos utilizadores e que por esta razão ficam desde já aqui justificados.

Os seguintes valores foram retirados de [32]:

Tabela 4.1 – Valores para o ar utilizados no algoritmo.

número de Prandtl		0,707
n médio		0,35
cp ar	J/(kg.K)	1007
massa volúmica do ar	kg/m ³	1,2
viscosidade ar	N.s.m ⁻²	0,00001846
k ar	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,0263

Os valores da Tabela 4.2 foram convertidos para unidades SI a partir de valores existentes no programa GSHP do RETScreen [33]:

Tabela 4.2 – Valores para o solo utilizados no algoritmo.

	Difusibilidade (m ² /h)	Condutividade (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Massa volúmica (kg m ⁻³)
Solo arenoso húmido	0,0019	0,865	1607
Solo arenoso seco	0,0010	0,346	1446
Solo argiloso húmido	0,0023	1,298	2105
Solo argiloso seco	0,0019	0,865	2009
Solo rochoso	0,0037	2,423	2813
Solo rochoso denso	0,0046	3,461	3214
Solo gelado	0,0040	1,331	1587
Solo gelado denso	0,0050	1,997	2078

4.5 Análise de custos e síntese financeira

A análise de custos e síntese financeira do programa apresentado neste trabalho são muito simples. Consiste, primeiramente, na folha “Análise de custos” (Figura 4.4) onde o utilizador introduz as quantidades e os custos unitários, sendo calculados os custos iniciais de instalação, os custos de operação e manutenção anuais e outros custos periódicos. Posteriormente, estes dados são transportados para a folha de “Síntese financeira” (Figura 4.5). Aí, são também introduzidos os valores: da energia, do tempo de vida do projecto, da taxa de inflação geral, taxa inflação energia e taxa remuneração aplicação sem risco. Juntamente com os dados, presentes na folha de “Início”, da energia produzida, é assim possível calcular a poupança anual.

Permutadores de Calor Ar-Solo - Análise de custos

Custos instalação					
	unidades	quantidade	custo unitário	quantia	moeda
retroscavadora	m3	1	0,00		0 €
mão-de-obra	p-h	1	0,00		0 €
tubos	m	1	0,00		0 €
ventilador	unidade	1	0,00		0 €
filtros	unidade	1	0,00		0 €
termoestato	unidade	1	0,00		0 €
ligação à casa		1	0,00		0 €
instalação interior		1	0,00		0 €
outro		1	0,00		0 €
total		1	250,00	250	€
Total de custos iniciais					250 €

Custos operação e manutenção anuais				
	unidades	quantidade	custo unitário	quantia
consumo da ventoinha	kWh	2,3	0,11	0,25 €
limpeza de tubos	p-h	1	5	5 €
outro				0 €
outro				0 €
Total de custos anuais				5,25 €

Custos periódicos			
	período (anos)	custo unitário	
substituição peças	5	20	20 €
outro	1	0	0 €
outro	1	0	0 €
Fim de vida do projecto	---		0 €

[Passar para a Síntese financeira](#)

Figura 4.4 – Aspecto da folha “Análise de custos”.

Com os valores de: tempo de vida do projecto, poupança anual, custos e taxas, calculam-se os *cash-flows* anuais, que são apresentados em tabela e em gráfico na folha de “Síntese financeira”.

São ainda calculados: o Valor Actual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) e o Período de Recuperação Actualizado (PRA), considerando um tempo de vida económica para o projecto de N anos.

$$VAL = \sum_{i=1}^N CF_{actualizados,i} \quad (23)$$

$$CF_{actualizado,i} = \frac{CF_i}{\left(1 + taxa_{desconto\ capital}\right)^i} \quad (24)$$

$$CF_i = CF_{presente} \cdot \left(1 + taxa_{inflação\ energia}\right)^i \quad (25)$$

$$CF_i = ganhos_i - custos_i \quad (26)$$

$i = ano$

$$taxa_{desconto\ capital} = \left(1 + taxa_{inflação\ geral}\right) \cdot \left(1 + taxa_{remuneração\ aplicação\ sem\ risco}\right) \cdot \left(1 + taxa_{risco}\right) - 1 \quad (27)$$

Considerou-se $taxa_{risco} = 0$

A TIR é a taxa que substituída na equação (24) faz o VAL ser igual a zero. Utilizou-se a função do Excel que calcula este valor automaticamente.

O PRA é o tempo necessário para recuperar o investimento. Nos cálculos efectuados corresponde ao ano em que o valor dos *cash-flows* acumulados passa a ser positivo.

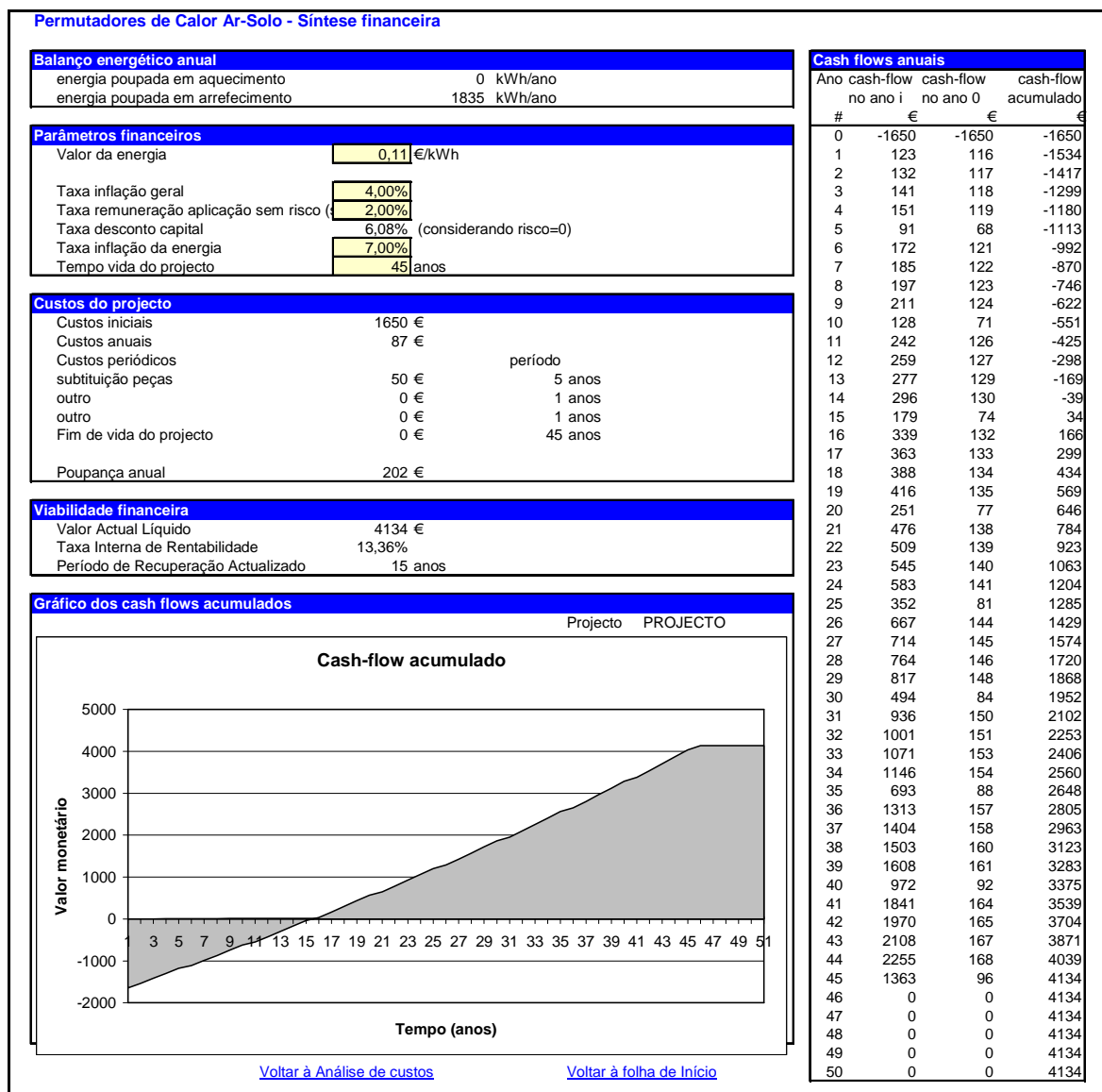


Figura 4.5 – Aspecto da folha “Síntese financeira”.

5 Aplicação do algoritmo desenvolvido

Neste capítulo são apresentados dois casos de aplicação do algoritmo, um no Algarve e outro em Aveiro. A metodologia utilizada foi a seguinte: imaginou-se um permutador com dados iniciais iguais aos sugeridos no capítulo 4.2. Introduziram-se os dados do local e uma estimativa dos custos. Nos custos de operação e manutenção anuais considerou-se 5€ para limpeza do sistema e 0,11€/kWh de electricidade para funcionamento do ventilador. Introduziu-se um custo de 20€, de 5 em 5 anos para substituição de peças.

Na folha de “Síntese financeira” considerou-se o tempo de vida do projecto de 45 anos, o preço da energia a 0,11€/kWh e os seguintes parâmetros financeiros:

- Taxa inflação geral = 4,00%
- Taxa remuneração aplicação sem risco (spread) = 2,00%
- Taxa inflação da energia = 7,00%

Estes valores são projecções para 20 anos, baseadas na situação actual em que o preço da energia tem subido muito acima dos restantes.

Verificaram-se os resultados financeiros. Decidiu-se ajustar o investimento inicial, de 10 em 10€, até se obter um valor de 10 anos para o Período de Recuperação Actualizado. O valor obtido para o investimento inicial será o valor máximo a pagar, de forma a ter um retorno do investimento em 10 anos. Este valor deveria ser comparado com dados reais, no entanto não foram encontrados valores na bibliografia consultada, nem foram solicitados orçamentos.

Foi feito um estudo paramétrico para saber se alterando as dimensões do permutador se obteria melhor rendimento, o que se reflecte na possibilidade de pagar mais pelo investimento inicial, para ter um retorno no mesmo período de 10 anos. Variaram-se os valores do permutador ligeiramente e registaram-se os valores de energia produzida e os custos máximos a pagar em cada caso.

5.1 Caso 1 – Algarve

Na folha de “Início” é preciso preencher os espaços reservados à informação necessária aos cálculos. Neste caso utilizaram-se dados para o ar e solo que a NASA tem à disposição [44]. Introduzindo uma latitude de 37°N e uma longitude -9°W, encontra-se a zona do Barlavento Algarvio.

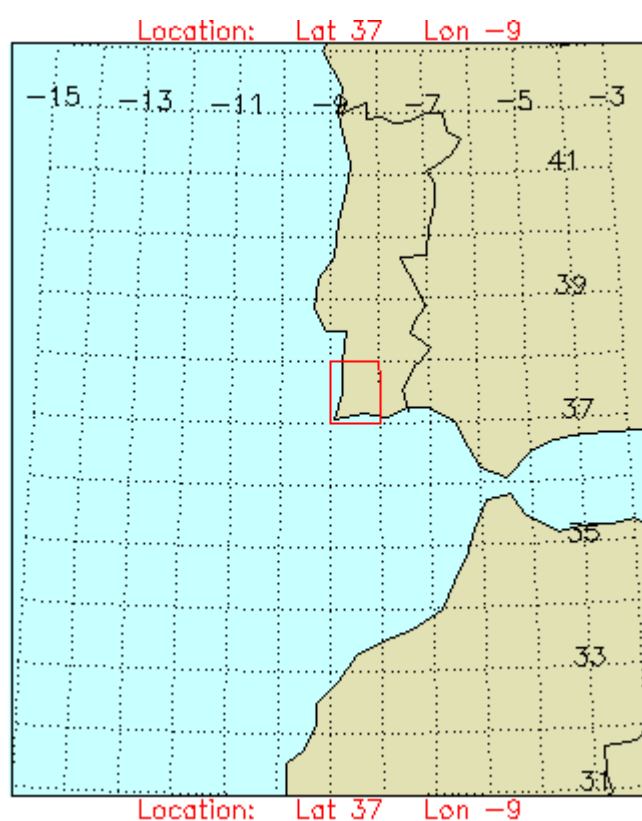


Figura 5.1 – Sinalização da quadrícula a que se referem os dados utilizados para o Algarve[44].

Os valores introduzidos para este caso apresentam-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Tabela com dados para o caso do Algarve.

Permutadores de Calor Ar-Solo - Início			Identificação do projecto ALGARVE		
Ar ambiente					
T média anual	°C	16,4			
Amplitude anual	°C	5,2			
Fase anual	data	15-Ago			
Amplitude diária	°C	4,70			
Fase diária	horas	15			
Solo					
T média anual	°C	17,1			
Amplitude anual	°C	8,33			
tipo de solo		Solo argiloso seco			
difusibilidade	m ² /h	0,0019			
Sol					
		Radiação sup vertical (kWh/(m ² dia)	Hora do Nascer do Sol	Hora do Pôr do Sol	
Estes dados poderão ser obtidos em:		jan	2,08	7:44	17:38
radiação		fev	3,22	7:21	18:12
retscreen SWH		mar	3,61	6:44	18:39
nascer e pôr do sol		abr	3,09	5:58	19:06
		mai	3,44	5:24	19:33
		jun	3,48	5:12	19:53
		jul	3,58	5:24	19:52
		ago	3,30	5:48	19:24
		set	2,76	6:14	18:40
		out	2,01	6:39	17:56
		nov	1,30	7:10	17:23
		dez	1,58	7:38	17:16
Permutador					
comprimento de cada tubo	m	20			
diâmetro de cada tubo	m	0,2			
profundidade	m	2			
velocidade do ar	m/s	4,00			
rendimento do ventilador	%	80%			
Conforto					
T conforto Inverno	°C	20			
T conforto Verão	°C	25			
COP sistema aquecimento comparação		3,5			
COP sistema arrefecimento comparação		2,5			
Energia					
energia poupada em aquecimento	kWh th/ano	837	por tubo		
energia poupada em arrefecimento	kWh th/ano	158	por tubo		
energia poupada em aquecimento	kWh elect/ano	239	por tubo		
energia poupada em arrefecimento	kWh elect/ano	63	por tubo		
energia gasta em aquecimento	kWh elect/ano	1,9	por tubo		
energia gasta em arrefecimento	kWh elect/ano	0,4	por tubo		
COP aquecimento		444			
COP arrefecimento		417			

[Passar para a Análise de custos](#)

Com estes dados é possível calcular as temperaturas para todo o ano do ar ambiente, solo e ar à saída do tubo.

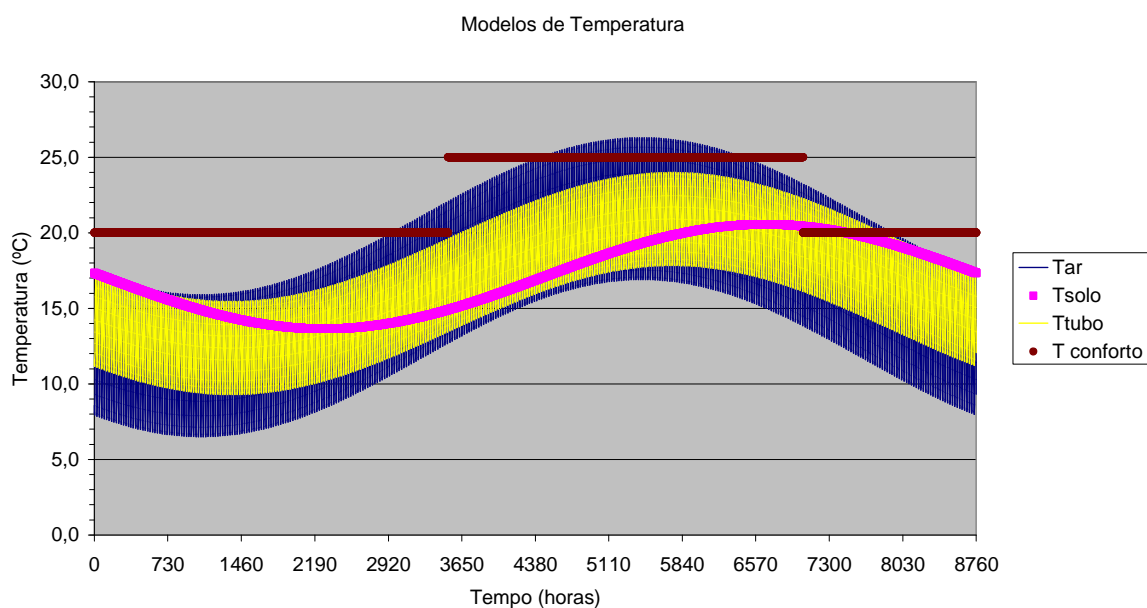


Figura 5.2 – Gráfico anual resultante da aplicação dos modelos aos dados da NASA para a região do Barlavento Algarvio.

Na Figura 5.2 podem ver-se a atenuação e desfaseamento anuais da temperatura do solo em relação ao ar. É notável também a redução da amplitude da temperatura do ar à saída dos tubos em relação ao ar ambiente.

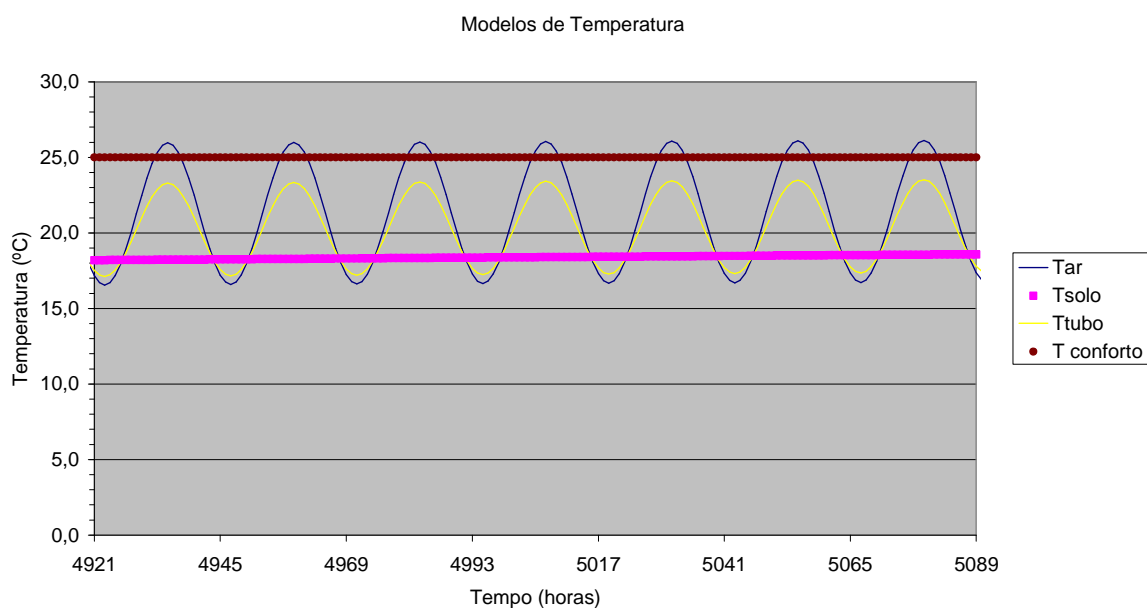


Figura 5.3 – Gráfico referente à última semana de Julho, calculado com o modelo.

A Figura 5.3 é uma ampliação do gráfico anterior, correspondendo à última semana de Julho. Verifica-se que, com os parâmetros anteriormente escolhidos para os tubos, se consegue uma redução de 26 °C para 23 °C na hora de maior calor.

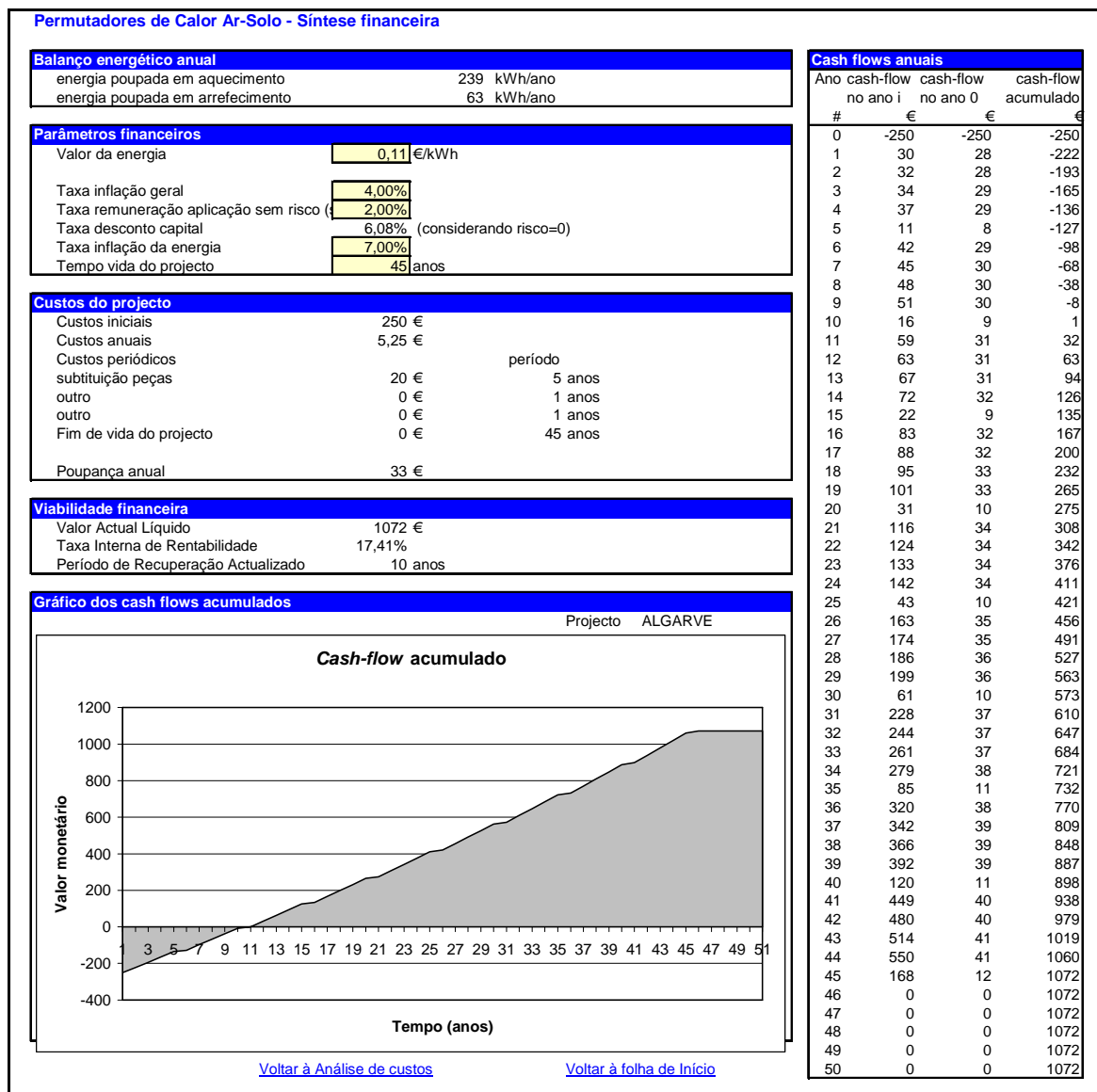


Figura 5.4 – Folha de “Síntese financeira” para o Algarve.

O valor máximo a pagar pelo material e instalação do sistema, nas condições deste caso, para recuperar o investimento em 10 anos é de 250€.

Com este valor obtem-se:

Valor Actual Líquido = 1072€

Taxa Interna de Rentabilidade = 17,41%

Ao valor do custo inicial encontrado deverá ser somado o valor poupado por não ser necessário adquirir outro meio de climatização e o valor da redução de emissão dos gases com efeito de estufa.

5.2 Caso 2 – Aveiro

Utilizou-se o mesmo método que no exemplo anterior, desta feita aplicado a Aveiro, ao qual corresponde uma latitude de 40°N e uma longitude -9°W.

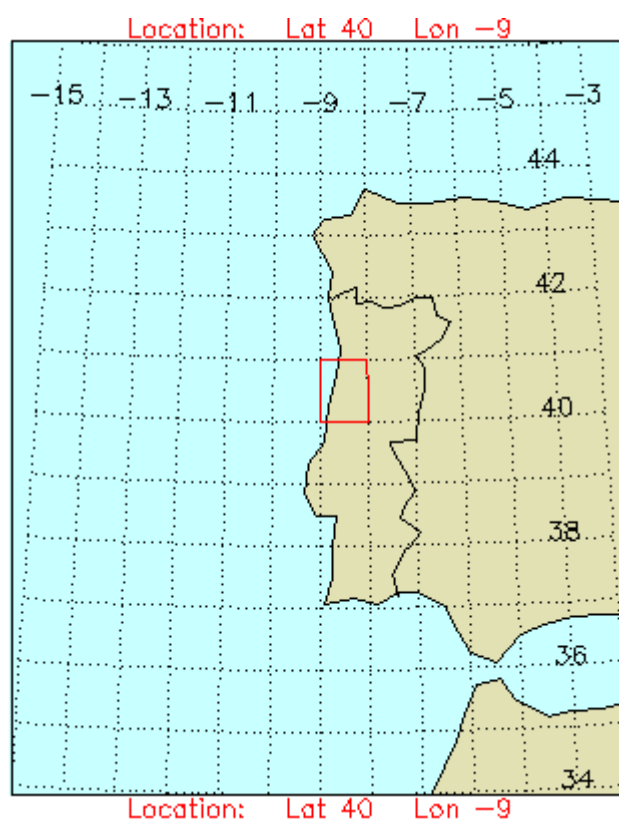


Figura 5.5 – Sinalização da quadrícula a que se referem os dados utilizados para Aveiro[44].

Os dados introduzidos na folha “Início” para o projecto Aveiro encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Tabela com dados para o caso de Aveiro.

Permutadores de Calor Ar-Solo - Início				Identificação do projecto	
Ar ambiente				AVEIRO	
Tmédia anual	°C	14,4			
Amplitude anual	°C	6,04			
Fase anual	data	1-Ago			
Amplitude diária	°C	5,45			
Fase diária	horas	15			
Solo					
Tmédia anual	°C	14,7			
Amplitude anual	°C	10,2			
tipo de solo		Solo arenoso húmido			
difusibilidade	m ² /h	0,0019			
Sol					
		Radiação sup vertical (kWh/(m ² dia)	Hora do Nascer do Sol	Hora do Pôr do Sol	
Estes dados poderão ser obtidos em:		jan	2,07	7:52	17:31
radiação		fev	2,55	7:26	18:07
retscreen SWH		mar	3,36	6:44	18:38
nascer e pôr do sol		abr	3,70	5:55	19:10
		mai	3,93	5:17	19:40
		jun	4,02	5:03	20:02
		jul	4,10	5:15	20:00
		ago	4,17	5:43	19:29
		set	3,79	6:12	18:42
		out	2,94	6:42	17:53
		nov	2,11	7:17	17:16
		dez	1,87	7:46	17:08
Permutador					
comprimento de cada tubo	m	20			
diâmetro de cada tubo	m	0,2			
profundidade	m	2			
velocidade do ar	m/s	4,00			
rendimento do ventilador	%	80%			
Conforto					
T conforto Inverno	°C	20			
T conforto Verão	°C	25			
COP sistema aquecimento comparação		3,5			
COP sistema arrefecimento comparação		2,5			
Energia					
energia poupada em aquecimento	kWh th/ano	895	por tubo		
energia poupada em arrefecimento	kWh th/ano	164	por tubo		
energia poupada em aquecimento	kWh elect/ano	256	por tubo		
energia poupada em arrefecimento	kWh elect/ano	65	por tubo		
energia gasta em aquecimento	kWh elect/ano	1,8	por tubo		
energia gasta em arrefecimento	kWh elect/ano	0,4	por tubo		
COP aquecimento		487			
COP arrefecimento		378			
Passar para a Análise de custos					

Com estes dados é possível calcular as temperaturas para todo o ano do ar ambiente, solo e ar à saída do tubo (Figura 5.6).

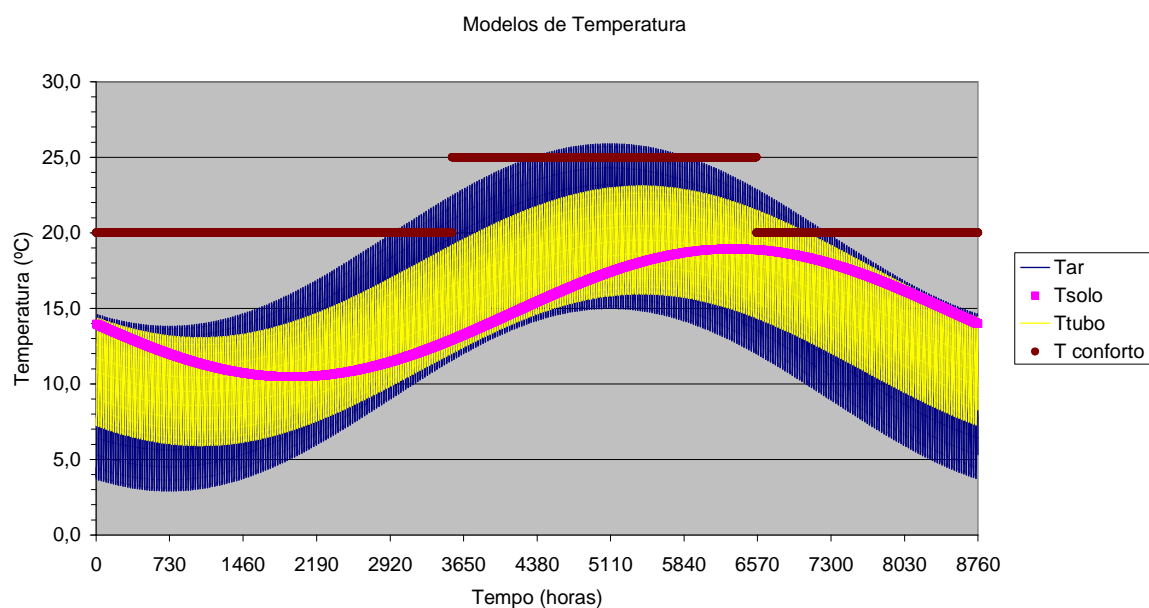


Figura 5.6 – Gráfico anual resultante da aplicação dos modelos aos dados da NASA para a região de Aveiro.

A Figura 5.7 é uma ampliação do gráfico anterior, correspondendo à última semana de Julho. Verifica-se que, com os parâmetros anteriormente escolhidos para os tubos, se consegue uma redução de 26 °C para 23 °C na hora de maior calor.

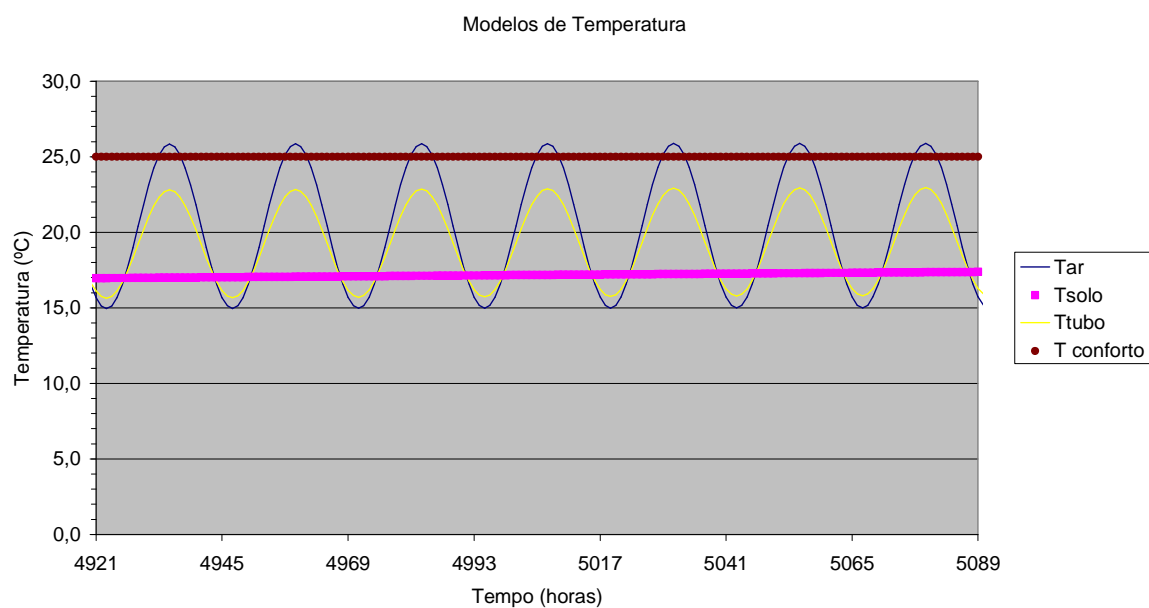


Figura 5.7 – Gráficos referentes à última semana de Julho, calculados com os modelos.

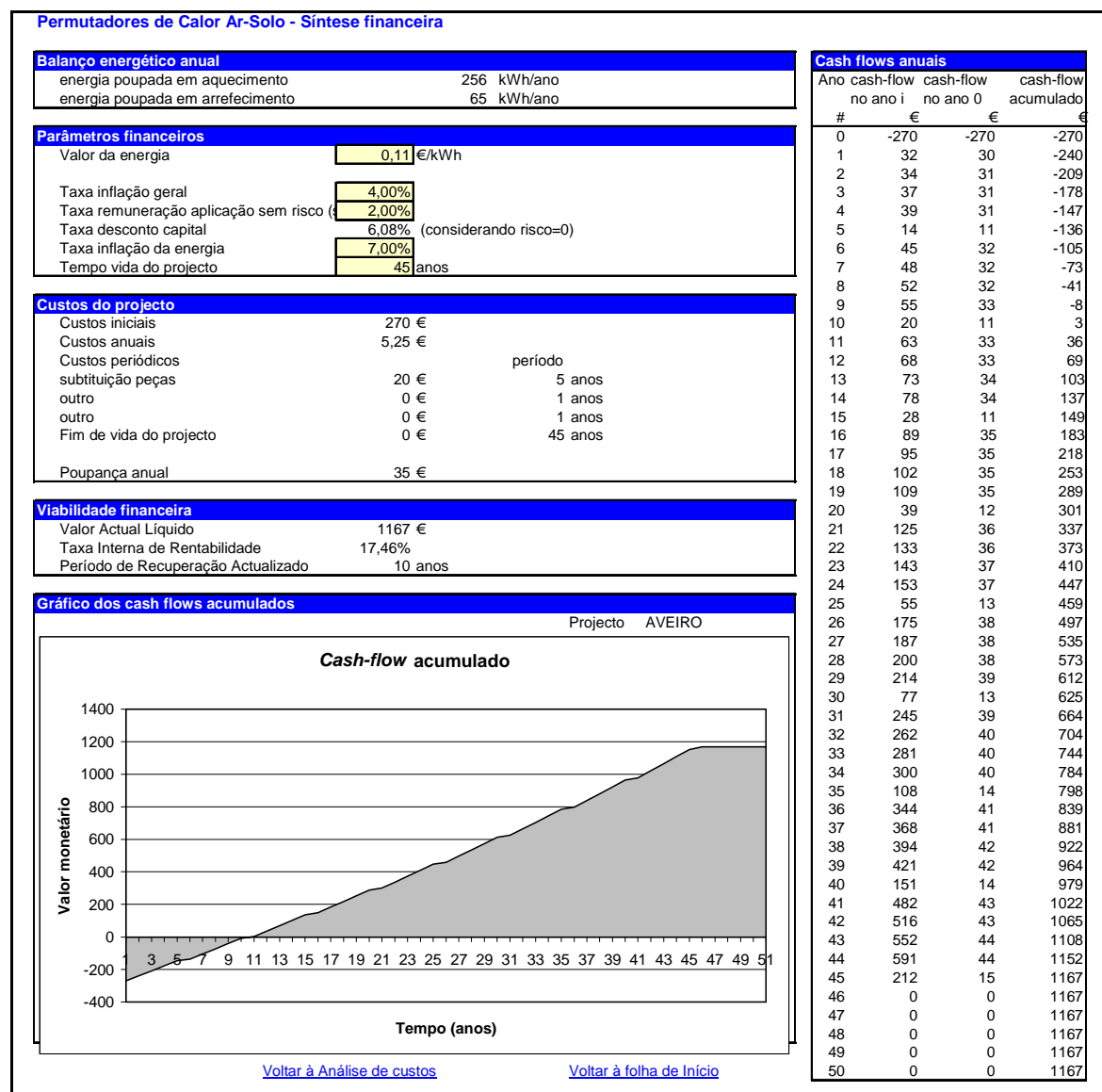


Figura 5.8 – Aspecto da folha “Síntese financeira” para o projecto Aveiro.

O valor máximo a pagar, nas condições deste caso, para recuperar o investimento em 10 anos é de 270€.

Com este valor obtem-se:

Valor Actual Líquido = 1167€

Taxa Interna de Rentabilidade = 17,46%

O valor a pagar neste caso é superior ao caso anterior, o que pressupõe que a situação em Aveiro é mais favorável do que no Algarve. Esta conclusão contraria as expectativas iniciais de que a região do Algarve fosse mais adequada à utilização de permutadores.

Este resultado ocorre porque em Aveiro o permutador fornece mais energia de arrefecimento, devido à temperatura do solo em Aveiro ser mais baixa que no Algarve e fornece mais energia de aquecimento porque a temperatura do ar em Aveiro é mais baixa, havendo uma maior diferença de temperatura entre o ar à entrada e à saída dos tubos.

5.3 Estudo paramétrico

Com o objectivo de verificar se os parâmetros escolhidos inicialmente para os permutadores poderiam ser melhorados, foi realizado um estudo paramétrico centrado nos casos apresentados anteriormente, variando separadamente o comprimento, diâmetro, profundidade e velocidade. Para cada caso registou-se a energia térmica poupada, custo máximo para obter retorno em 10 anos, valor actual líquido (VAL) e taxa interna de rentabilidade (TIR).

Nos gráficos da energia produzida por um tubo ao longo de um ano em função do comprimento, diâmetro, profundidade e velocidade do ar, pode verificar-se que para todos os parâmetros à medida que estes aumentam, aumenta também a energia produzida. No entanto este aumento tem tendência para ser cada vez menor. Este comportamento verifica-se de igual modo no Algarve e em Aveiro.

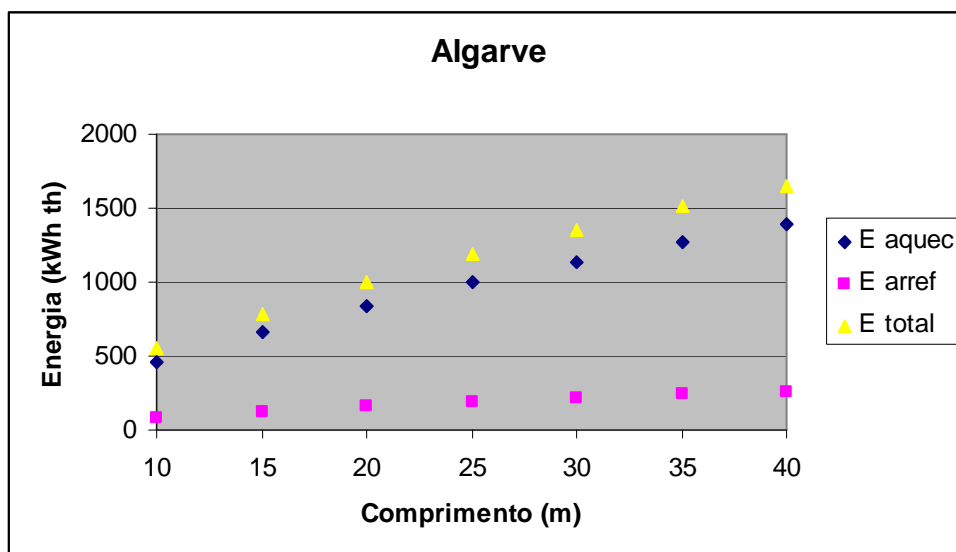


Figura 5.9 – Variação da energia fornecida com o comprimento do tubo.

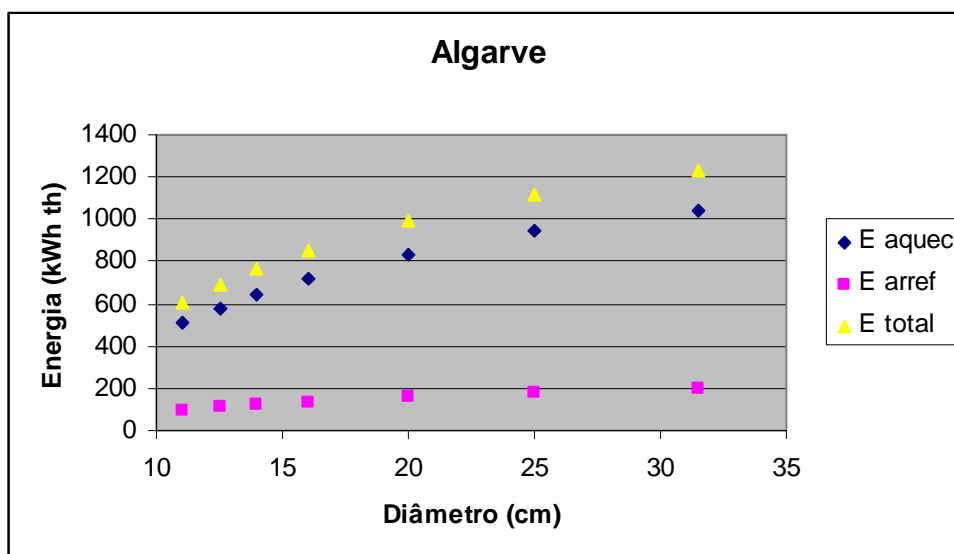


Figura 5.10 – Variação da energia fornecida com o diâmetro do tubo.

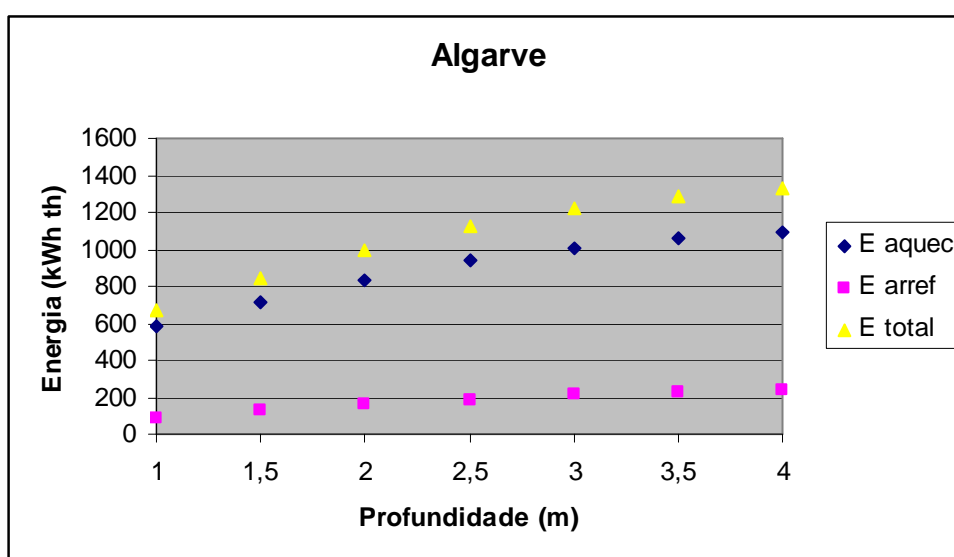


Figura 5.11 – Variação da energia fornecida com a profundidade do tubo.

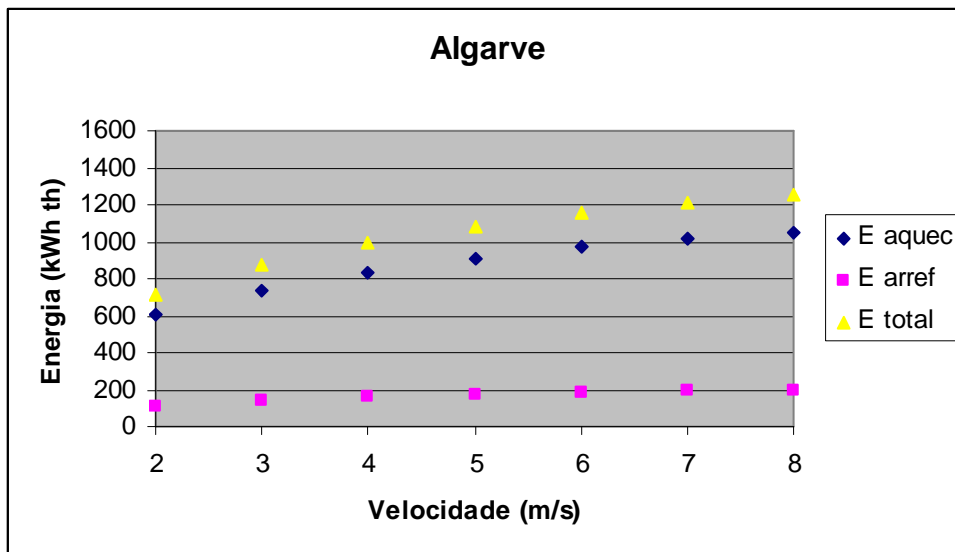


Figura 5.12 – Variação da energia fornecida com a velocidade do ar no tubo.

À medida que as condições de produção de energia se tornam melhores, os custos iniciais aumentam, uma vez que o mercado estará disposto a pagar mais para ter benefícios equivalentes.

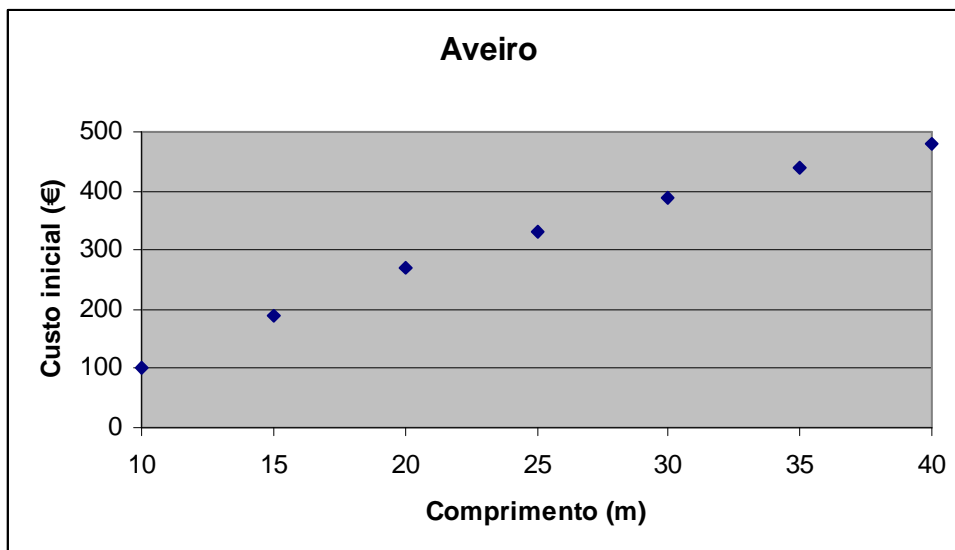


Figura 5.13 – Variação do custo inicial máximo com o comprimento.

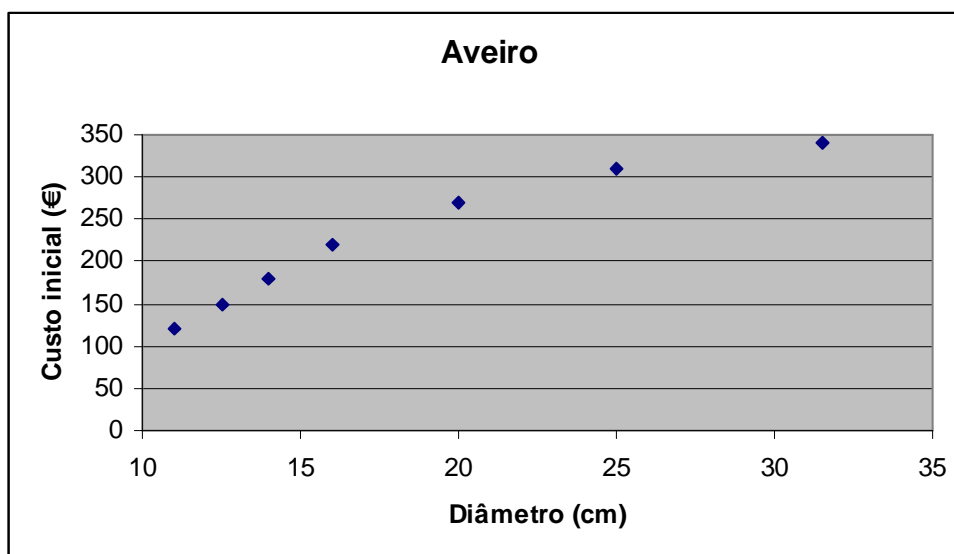


Figura 5.14 – Variação do custo inicial máximo com o diâmetro.

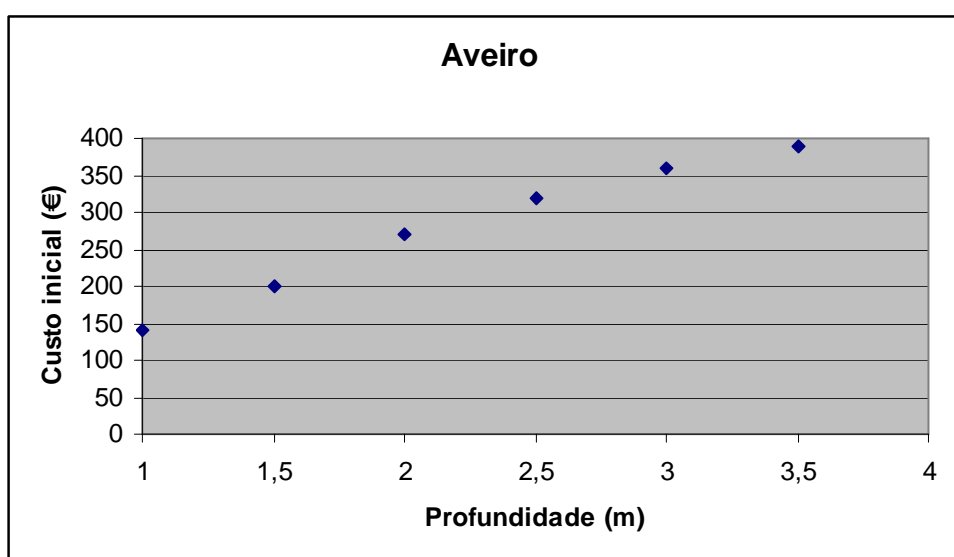


Figura 5.15 – Variação do custo inicial máximo com a profundidade.

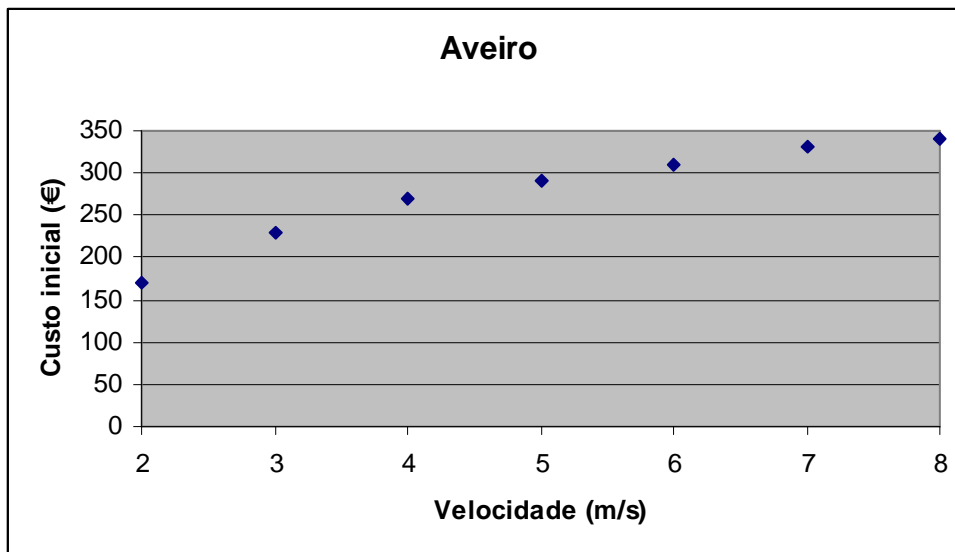


Figura 5.16 – Variação do custo inicial máximo com a velocidade.

O que pode acontecer é que este aumento na disponibilidade para pagar mais não seja suficiente para cobrir o aumento dos custos reais do novo comprimento, diâmetro, profundidade e velocidade.

5.4 Análise de sensibilidade

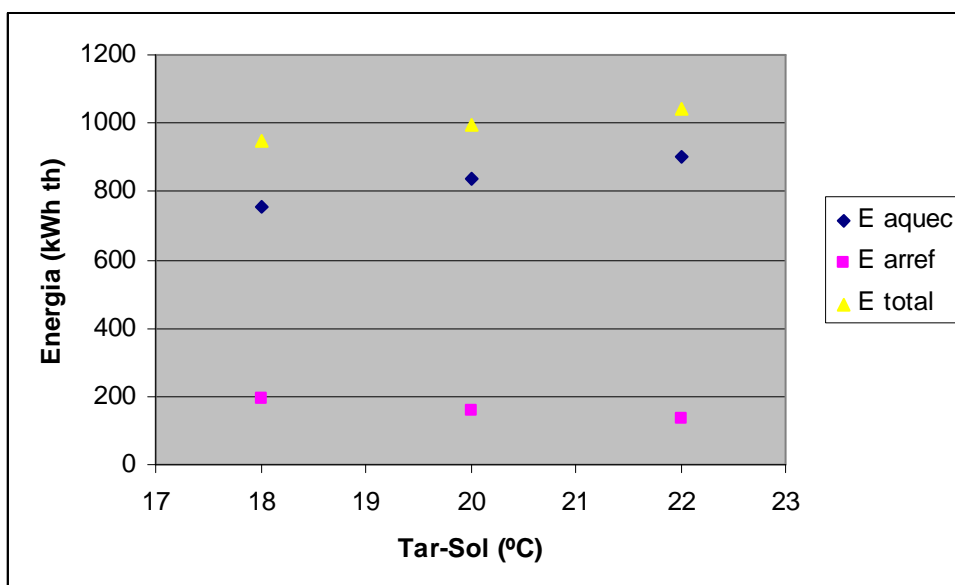


Figura 5.17 – Variação da energia produzida com a temperatura ar-Sol.

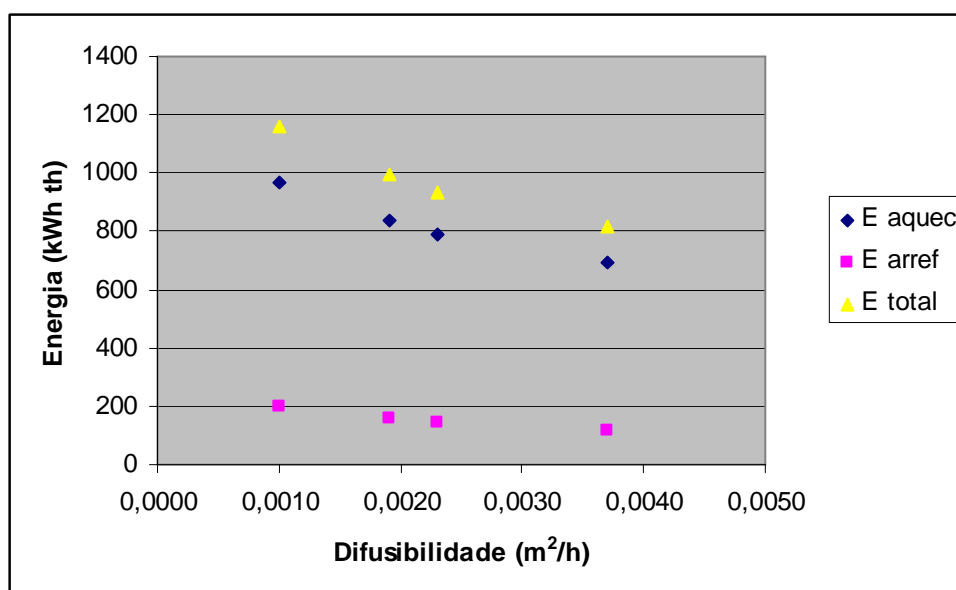


Figura 5.18 – Variação da energia produzida com a difusibilidade.

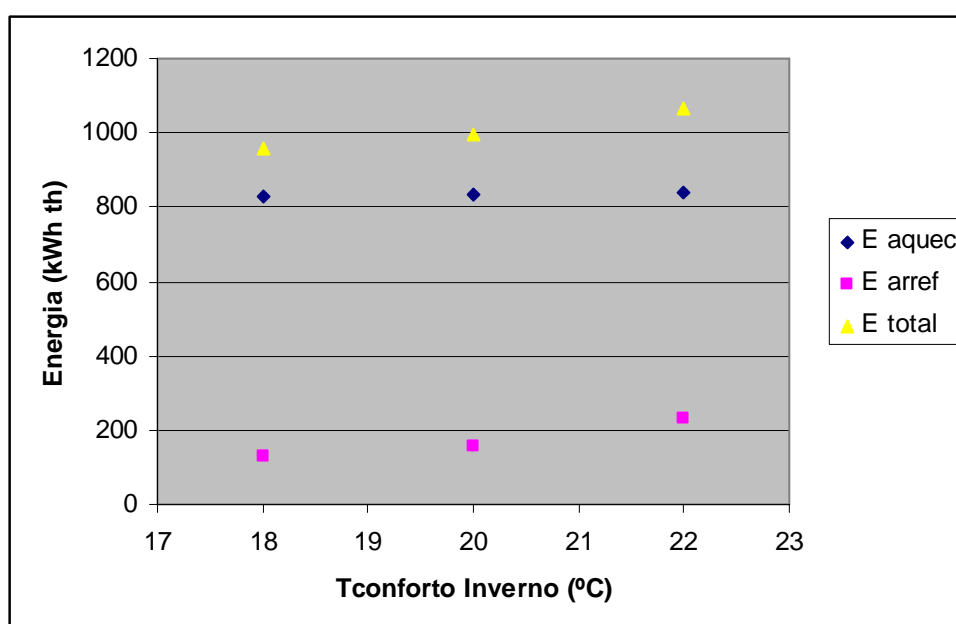


Figura 5.19 – Variação da energia produzida com a temperatura de conforto de Inverno.

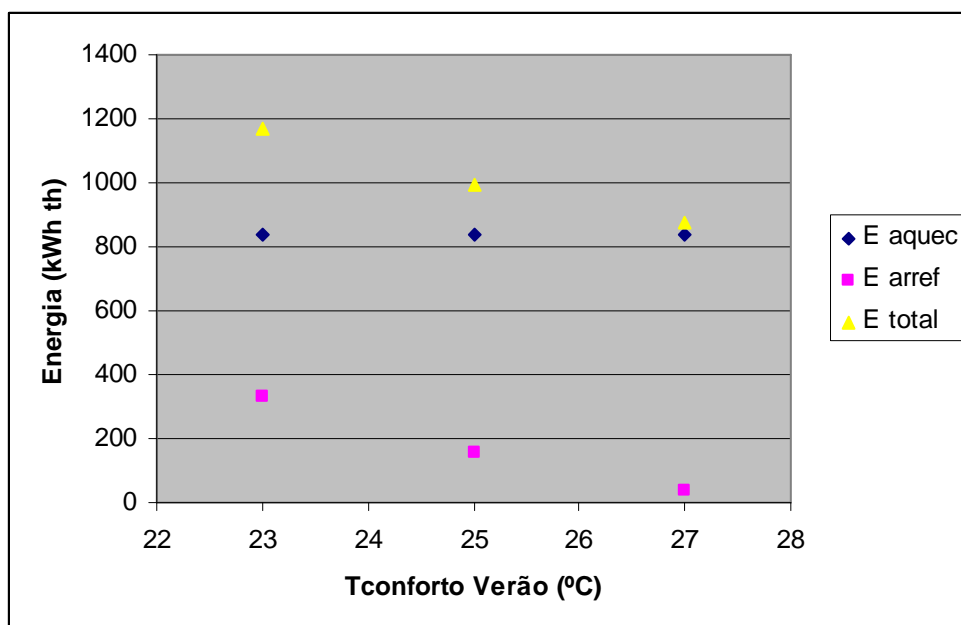


Figura 5.20 – Variação da energia produzida com a temperatura de conforto de Verão.

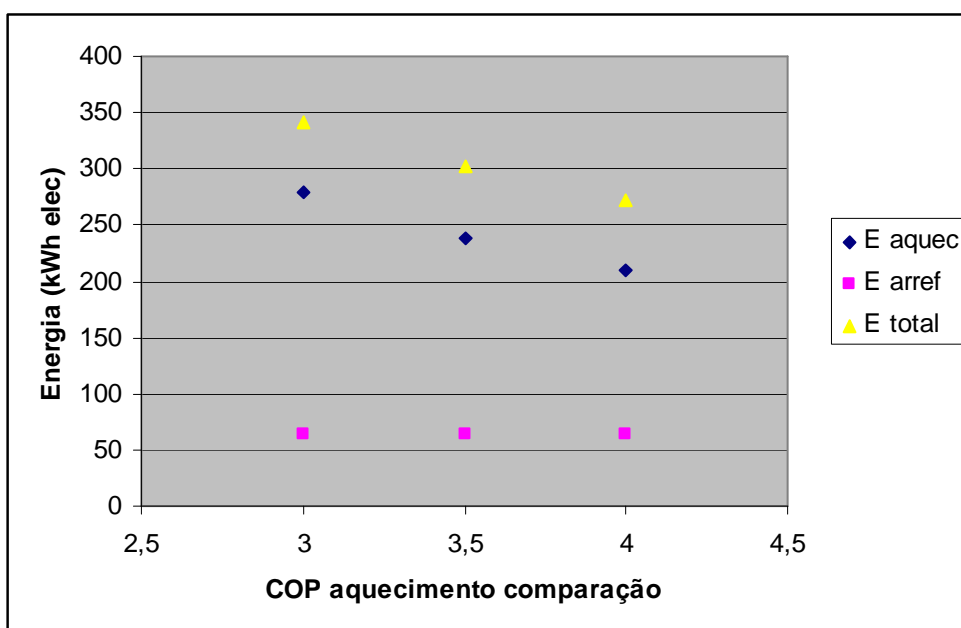


Figura 5.21 – Variação da energia produzida com o coeficiente de desempenho de aquecimento do sistema de comparação.

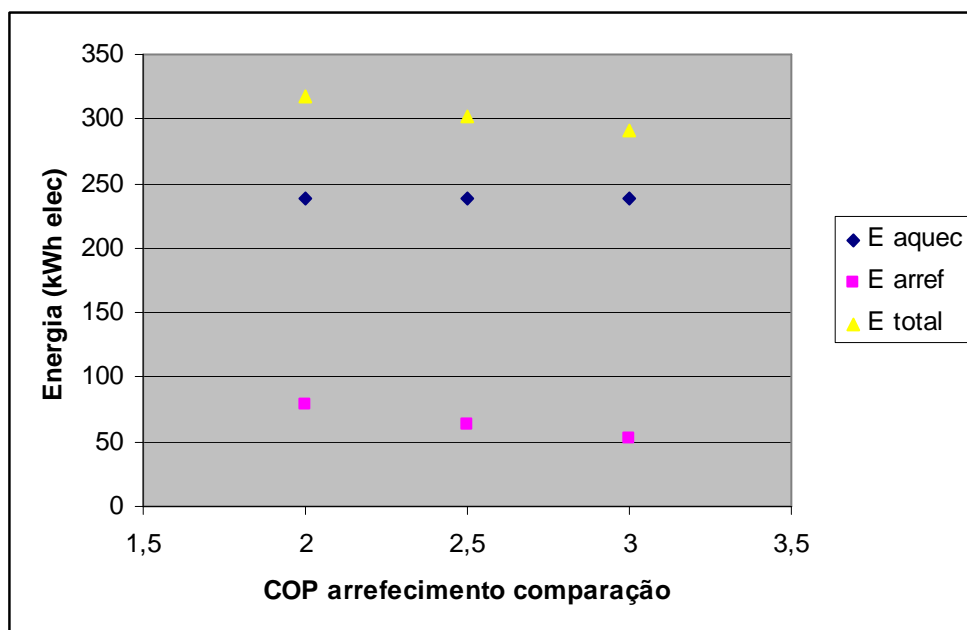


Figura 5.22 – Variação da energia produzida com o coeficiente de desempenho de arrefecimento do sistema de comparação.

6 Conclusões

A situação energética a nível mundial é cada vez mais preocupante para um maior número de pessoas. A actual dependência dos combustíveis fósseis é insustentável e como tal têm surgido várias alternativas de produção de energia através de fontes renováveis e técnicas de redução dos consumos energéticos. Sendo o sector da climatização e ventilação de edifícios dos que mais energia consome, têm surgido soluções interessantes para este problema. Algumas destas soluções são inspiradas em técnicas antigas, que entretanto tinham sido postas de lado nas sociedades modernas.

A energia geotérmica de baixa profundidade existe desde sempre e está disponível em todo o mundo. Era já empiricamente conhecida pelos povos que construía as suas casas escavadas no solo. Recentemente retornou-se ao seu uso através de tubos enterrados no solo onde se faz passar o ar que posteriormente entra dentro do edifício. A estes tubos chamam-se permutadores de calor ar-solo.

Existem vários artigos científicos publicados sobre permutadores de calor ar-solo, contudo estes não são muito conhecidos do público em geral nem dos profissionais da área da construção. Está provado que, em certos casos, a energia produzida desta forma é suficiente para garantir a climatização, dispensando outro tipo de aparelhos. Mesmo nos casos em que a climatização não é totalmente garantida, a utilização de permutadores de calor ar-solo pode servir como sistema complementar, reduzindo os consumos de outra energia. Desta forma é possível diminuir a produção de gases com efeitos de estufa, uma vez que a energia geotérmica de baixa profundidade é uma energia renovável.

O desempenho do permutador de calor ar-solo depende de muitas variáveis. As mais importantes são: velocidade do ar, comprimento, diâmetro, profundidade e número de tubos. A eficácia do permutador de calor ar-solo aumenta com um

aumento do comprimento do tubo. Também há um aumento na eficácia quando o tubo é enterrado a profundidades maiores. Aumentando o diâmetro do tubo, a capacidade do sistema diminui. Uma velocidade do ar no tubo mais elevada conduz a uma redução da capacidade dos permutadores [37]. Aparentemente quanto maior o número de tubos, melhor, sendo apenas limitado por questões económicas.

Existem alguns programas para dimensionar estes sistemas. Não são de fácil acesso ou têm o seu uso limitado. Nesta dissertação, foi desenvolvido um novo algoritmo de cálculo para análise da pré-viabilidade dos permutadores de calor ar-solo. Este algoritmo pode ser utilizado para qualquer localização do planeta. Foi desenvolvido em Excel, que é uma ferramenta conhecida mundialmente, facilitando assim a sua aprendizagem. Como a sua estrutura é semelhante à do RETScreen é de fácil adaptação aos milhares de utilizadores deste programa. Apesar do cálculo ser efectuado hora a hora ao longo do ano não deixa de ser rápido e deste modo permite uma visualização gráfica da simulação muito mais “real” e ergonómica.

Dos casos de estudo apresentados verifica-se que a temperatura à saída dos tubos enterrados é favorável numa grande parte do ano. Surpreendeu o resultado do permutador em Aveiro fornecer mais energia de arrefecimento que no Algarve.

Com a escalada dos preços do petróleo e dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera, é imperativo que os combustíveis fósseis sejam, na medida do possível, substituídos por energias renováveis. Os permutadores de calor ar-solo são uma alternativa que, em muitos casos, é viável em termos energéticos. Em termos económicos poderá vir a ser mais vantajosa caso sejam subsidiadas as energias renováveis e/ou taxadas as emissões de gases com efeito de estufa. Ambientalmente, com vantagens de peso quando comparadas com as desvantagens, os permutadores de calor ar-solo são uma opção a considerar daqui para a frente.

7 Sugestões de trabalho futuro

Em qualquer processo de dimensionamento de um projecto existe uma “negociação” entre precisão e custo. O objectivo do presente trabalho foi criar uma ferramenta de análise da pré-viabilidade, ou seja, algo que fosse económico, simples de compreender, fácil de preencher e desse resultados rápidos, aceitando que podia ter algumas simplificações e por isso alguns desvios da realidade. A melhoria é um processo contínuo e o programa proposto tem alguns pontos que poderão ser melhorados no futuro.

O método utilizado no cálculo da radiação solar obriga à introdução de muitos dados e ainda assim é grosseiro pois considera a radiação solar igual ao longo de todo o dia. Sendo este um valor importante para o algoritmo, devia ser encontrado um modo de cálculo mais simples e rigoroso, por exemplo de uma forma automática a partir da localização do projecto.

Uma das desvantagens apontadas aos permutadores é a possibilidade de crescimento de microorganismos nos tubos devido à humidade. A humidade é também um dos parâmetros de conforto dos edifícios com influência na climatização. De forma a melhorar o algoritmo desenvolvido, sugere-se a utilização de um modelo de previsão da humidade do ar e da sua variação ao passar pelo permutador de calor ar-solo.

A análise financeira efectuada é muito simples, podendo ser melhorada, no futuro, de forma a incluir a possibilidade de utilizar valores de subsídios ou empréstimos nos cálculos.

À semelhança do RETScreen, deverá ser incluída uma folha de análise da redução dos gases com efeito de estufa conseguida com a utilização do permutador de calor ar-solo.

Simular é representar a realidade. É uma tarefa por vezes difícil, especialmente quando a realidade depende de muitas variáveis. Só é possível afirmar que o resultado de um modelo de simulação está próximo da realidade, se se conhecerem os dados reais. Durante este trabalho foram encontradas algumas dificuldades na pesquisa de dados reais.

Em Portugal, não existem medições regulares de temperaturas do solo a profundidades superiores a 1m e existem vários edifícios com permutadores de calor ar-solo a funcionarem apenas com uma avaliação qualitativa. Seria muito bom que se recolhessem dados numéricos para ser possível a sua utilização na validação de modelos.

O calor trocado com o ar faz com que o solo que rodeia o tubo não tenha exactamente a mesma temperatura do solo não perturbado. Apesar de existir um artigo que refere que a influência do tubo na temperatura do solo circundante é limitada a uma distância de duas vezes o seu diâmetro [28], seria interessante ter mais informação sobre a influência do permutador na temperatura do solo circundante.

Na bibliografia encontram-se exemplos de permutadores de calor ar-solo com tubos de betão, metal e plástico. No entanto, não existe informação sobre a influência do material dos tubos no desempenho do permutador. Sugere-se que, no futuro, seja feita uma análise de qual o tipo de material melhor para servir de permutador de calor ar-solo.

8 Bibliografia

1. James P. Dorian, Herman T. Franssen and Dale R. Simbeck, Global challenges in energy, Energy Policy, Volume 34, Issue 15, October 2006, Pages 1984-1991. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2W-4G63JB4-1/2/5231dbafd3b56030a16c136f4a15d9a2>)
2. eds.NORTE – Energia e Desenvolvimento Sustentável na Região Norte, Eficiência Energética no Sector Empresarial, 2006.
3. Moncef Krarti and Jan F. Kreider, Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel, Energy Conversion and Management, Volume 37, Issue 10, October 1996, Pages 1561-1574. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2P-3VVTX3C-B/2/efaeb3e0b122808adb9b97705de00538>)
4. Jes Mainwaring, AlmaVerde – Casa Borboleta, Prêmios DGE 2003, Eficiência Energética em Edifícios, Edifício Residencial.
5. The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living, consultada em 2008. (http://www.daviddarling.info/encyclopedia/H/AE_heat_pump.html)
6. Marcio Maia Vilela, Estudo de método experimental para determinar a potencialidade do uso de energia geotérmica a baixa profundidade, Tese Doutorado, Universidade São Paulo, 2004. (http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2004/Teses/tese_vilela.pdf)
7. Joseph Khedari, Watchara Permchart, Naris Pratinthong, Sirichai Thepa and Jongjit Hirunlabh, Field study using the ground as a heat sink for the condensing unit of an air conditioner in Thailand, Energy, Volume 26, Issue 8, August 2001, Pages 797-810.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2S-43MKKYN-5/2/b454ed57b08599d53b12ae6a82bc73e7>)

8. Burkhard Sanner, Constantine Karytsas, Dimitrios Mendrinou and Ladislaus Rybach, Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, *Geothermics*, Volume 32, Issues 4-6, August-December 2003, Pages 579-588.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCN-49CMDYC-2/2/2c51ef7ec5dbd97378fb24890ca6355f>)

9. Yasuhiro Hamada, Makoto Nakamura, Kiyoshi Ochifuji, Katsunori Nagano and Shintaro Yokoyama, Field performance of a Japanese low energy home relying on renewable energy, *Energy and Buildings*, Volume 33, Issue 8, October 2001, Pages 805-814.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-43T25J6-5/2/d7c331017d3a135fefa97f0b84e7eebb>)

10. Yuehong Bi, Lingen Chen and Chih Wu, Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification, *Applied Thermal Engineering*, Volume 22, Issue 2, February 2002, Pages 183-189.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V1Y-44CHNMC-7/2/c2e446cb39d78aa485fdc43bbd599fcd>)

11. Srinivas Garimella, Innovations in energy efficient and environmentally friendly space-conditioning systems, *Energy*, Volume 28, Issue 15, December 2003, Pages 1593-1614.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2S-49DN5HD-1/2/734ebaf38050d8fb8c5b3bd461e75e89>)

12. Sustainability at West Chester University, consultado em 2008.

(<http://vortex.wcupa.edu/ec/geothermal.shtml>)

13. National Renewable Energy Laboratory, How to build a better home.

(<http://www.nrel.gov/docs/fy00osti/26582.pdf>)

14. René Cotting, Barriers to natural ventilation design of office buildings, July 1998.

(<http://projects.bre.co.uk/natvent/reports/barrier/nlbar.pdf>)

15. Alexander, Jenkis, Jones, Investigating the effects of wind on natural ventilation design of commercial buildings, Welsh school of architecture, February 1997.

16. R. Seifert, J. Schmid, R. Johnson, and D. Wilkinson, Indoor air quality in cold climates and ventilation strategies.

17. Angelo Delsante, Yuguo Li, Natural Ventilation Induced by Combined Wind and Thermal Forces in a Two-Zone Building, Australia, 1999.

(http://hybvent.civil.auc.dk/publications/report/delsante_li.pdf)

18. Sociedade Portuguesa de Energia Solar, SPES newsletter, Abril 2004.

(www.spes.pt)

19. Página Dyer Environmental Controls, consultada em 2008.

(http://www.dyerenvironmental.co.uk/natural_vent_systems.html)

20. Girja Sharan, Performance of single pass earth tube heat exchanger: An experimental study, 2003.

(<http://www.iimahd.ernet.in/publications/data/2003-01-07GirjaSharan.pdf>)

21. Girja Sharan, Jethava Kamalesh, Shamante Anand, Greenhouse cultivation in a hot arid area, 2005.

(<http://www.iimahd.ernet.in/publications/data/2005-01-06gsharan.pdf>)

22. Viorel Badescu, Economic aspects of using ground thermal energy for passive house heating, *Renewable Energy*, Volume 32, Issue 6, May 2007, Pages 895-903.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4S-4K8S5NK-2/2/4e75ce9cf8929b3f49ef55c9c6ec22b7>)

23. N. M. Thanu, R. L. Sawhney, R. N. Khare and D. Buddhi, An experimental study of the thermal performance of an earth-air-pipe system in single pass mode, *Solar Energy*, Volume 71, Issue 6, December 2001, Pages 353-364.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V50-43YH6H8-1/2/fd9356d0aee8f8d4d6dacb1090dc3970>)

24. G. Mihalakakou, J. O. Lewis and M. Santamouris, The influence of different ground covers on the heating potential of earth-to-air heat exchangers, *Renewable Energy*, Volume 7, Issue 1, January 1996, Pages 33-46.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4S-3VV731M-4/2/e533f4fa6a491c406f338af8ad6fd712>)

25. Simone Vieira de Assis, *Agrometeorologia – Unidade 4*, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas.

(minerva.ufpel.edu.br/~assis/agro/agro_04.doc)

26. M. Santamouris, G. Mihalakakou, C. A. Balaras, A. Argiriou, D. Asimakopoulos and M. Vallindras, Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses, *Solar Energy*, Volume 55, Issue 2, August 1995, Pages 111-124.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V50-3YYMR4G-1F/2/47c9aaa7ceef2f2ba33df0431ab2bb89>)

27. M. De Paepe and A. Janssens, Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers, *Energy and Buildings*, Volume 35, Issue 4, , May 2003, Pages 389-397.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-47BXB66-1/2/529ecb15791419aea74a72782ec42e2d>)

28. Georgios Florides and Soteris Kalogirou, Ground heat exchangers--A review of systems, models and applications, Renewable Energy, In Press, Corrected Proof, Available online 26 March 2007.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4S-4NBRFP8-1/2/085c34a11dfca5b7b623d52b74edc1e7>)

29. Página da Universidade de Siegen, consultada em 2006.

(<http://nesa1.uni-siegen.de/>)

30. St. Benkert, F.D. Heidt, Designing earth heat exchangers with GAEA.

([http://wire0.ises.org/wire/doclibs/EuroSun98.nsf/id/CF4F1A43E8966243C1256771002E471F/\\$File/BenkertIV22.pdf](http://wire0.ises.org/wire/doclibs/EuroSun98.nsf/id/CF4F1A43E8966243C1256771002E471F/$File/BenkertIV22.pdf))

31. St. Benkert, F.D. Heidt, D. Schöler, Calculation tool for earth heat exchangers GAEA.

(<http://www.ibpsa.org/proceedings/bs97/papers/P008.PDF>)

32. M.A.A. Costa, Análise e projecto de um sistema de climatização solar passiva, Seminário de Processos Tecnológicos, Universidade de Aveiro, 2003.

33. Página do RETScreen, consultada em 2006.

(<http://www.retscreen.net/ang/menu.php>)

34. G. Mihalakakou, M. Santamouris, J. O. Lewis and D. N. Asimakopoulos, On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles, Solar Energy, Volume 60, Issues 3-4, March-April 1997, Pages 181-190.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V50-3SMT85B-6/2/c42e373fe58158d1ae555b0f35b51d23>)

35. Tzaferis and D. Liparakis M. Santamouris A. Argiriou, Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth-to-air heat exchangers, *Energy and Buildings*, Volume 18, Issue 1, 1992, Pages 35-43.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-47X812J-98/2/7f2fe4dc6bcad4dc39f74dc83bcf13a8>)
36. G. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos, Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers, *Solar Energy*, Volume 53, Issue 3, September 1994, Pages 301-305.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V50-49GTP0G-9/2/90d814b5544508702e1b528a87d87899>)
37. G. Mihalakakou, J.O. Lewis and M. Santamouris, On the heating potential of buried pipes techniques - application in Ireland, *Energy and Buildings*, Volume 24, Issue 1, 1996, Pages 19-25.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-3WCT00V-3/2/ab665ddea63748a126619921b127ee0c>)
38. M. Bojic, N. Trifunovic, G. Papadakis and S. Kyritsis, Numerical simulation, technical and economic evaluation of air-to-earth heat exchanger coupled to a building, *Energy*, Volume 22, Issue 12, December 1997, Pages 1151-1158.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2S-3SN7B0F-4/2/ff70324e97d21e96fb4440b83600de5b>)
39. Carol Gauthier, Marcel Lacroix and Hervé Bernier, Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses, *Solar Energy*, Volume 60, Issue 6, June 1997, Pages 333-346.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V50-3SN62GN-3/2/1601200747ff495661e05d8bfe743e76>)
40. Pierre Hollmuller, Bernard Lachal, Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects.

(http://www.unige.ch/cuepe/html/biblio/pdf/BuriedPipes_PLEA_1999.pdf)

41. Jens Pfafferott, Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency, Energy and Buildings, Volume 35, Issue 10, November 2003, Pages 971-983.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V2V-49567RB-1/2/d65cadf823758c834fbd0f922dfa0442>)

42. Helder Gonçalves, comunicação pessoal.

43. V. P. Kabashnikov, L. N. Danilevskii, V. P. Nekrasov and I. P. Vityaz, Analytical and numerical investigation of the characteristics of a soil heat exchanger for ventilation systems, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 45, Issue 11, May 2002, Pages 2407-2418.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V3H-44TV3VJ-1/2/7585ee9df1be6b74f682ba31f4b37c6f>)

44. Página da NASA/ RETScreen, consultada em 2006.

(<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>)

45. Página da NOAA, consultada em 2006.

(<http://www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/sunrise.html>)

46. Girja Sharan, Development and Some Applications of Earth Tube Heat Exchanger in Gujarat, 2004.

(<http://www.iimahd.ernet.in/publications/data/2004-05-05girjasharan.pdf>)

47. F. Al-Ajmi, D.L. Loveday and V.I. Hanby, The cooling potential of earth-air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, Building and Environment, Volume 41, Issue 3, March 2006, Pages 235-244.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V23-4FWKM7J-1/2/39afdfa7579edd9ec0b43fa26a77388d>)

- 48.D.L. Nofziger, Soil Temperature Changes with Time and Depth: Theory.

(<http://soilphysics.okstate.edu/software/SoilTemperature/document.pdf>)

- 49.Pierre Hollmuller, Analytical characterisation of amplitude-dampening and phase-shifting in air/soil heat-exchangers, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 46, Issue 22, October 2003, Pages 4303-4317.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V3H-49322HC-1/2/dbbf4f9ae69f85225f01c124377d7d75>)

- 50.M.A.A. Costa, M.S.A. Oliveira and N. Martins, Earth tube ventilation system: A project pre-feasibility analysis tool, International Conference on New and Renewable Energy Technologies for a Sustainable Development, Junho 2004 Évora, Portugal.

- 51.L. Serres, A. Trombe and J. H. Conilh, Study of coupled energy saving systems sensitivity factor analysis, Building and Environment, Volume 32, Issue 2, March 1997, Pages 137-148.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V23-3SMSMJC-8/2/c133dc7b435d3ec2ec5baba2d8db310b>)

- 52.Girja Sharan, R.K. Sahu, Ratan Jadhav, Air-cooling and Heating System for Tiger in Zoo using Earth Tube Heat Exchanger, 2002.

(<http://www.iimahd.ernet.in/publications/data/2002-02-02GirjaSharan.pdf>)

- 53.G. Sharan, H. Prakash, R. Jadhav, Performance of Greenhouse Coupled to Earth-Tube-Heat-Exchanger in Closed-Loop Mode, 2004.

(<http://www.iimahd.ernet.in/publications/data/2004-03-02gsharan.pdf>)

- 54.K. Clark, K. Foster, C. Hurt, J. Hale, Positioning Your Pork Operation for the 21st Century, Chapter 10: Segregated early weaning.

55. Departamento de Energias Renováveis, INETI, Edifício Solar XXI – Um edifício energeticamente eficiente em Portugal, Lisboa, Dezembro 2005.
56. Helder Gonçalves, Prémios DGE 2003, Eficiência Energética em Edifícios, Edifício Residencial, INETI.
57. Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal, Hélder Gonçalves e João Mariz Graça.
(<http://www.adene.pt/NR/rdonlyres/00000090/krpwqvoncsipenbxgwlyzdvvgcsskwwqh/ConceitosBioclim%C3%A1ticos.pdf>)
58. Adam Fjaerem, Simim Burton, coolhouse final monitoring report, Urbanização das Furnas, Jan 2004, Fabermaunsell.
(<http://www.softech-team.it/Coolweb/CoolHouse-Monitoring-PT.pdf>)
59. Visita à urbanização AlmaVerde e comunicação pessoal com Arq. Miguel Ferreira
60. Decreto Lei nº 80/2006 de 4 de Abril, Diário da República - I Série - A, nº67

Outras referências:

61. G. Mihalakakou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos and I. Tselepidaki, Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications, Solar Energy, Volume 55, Issue 3, September 1995, Pages 163-173.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V50-3YYMR44-14/2/2829f036cd7f7f436d9eea415cf9f12c>)
62. M. Santamouris, G. Mihalakakou, A. Argiriou and D. N. Asimakopoulos, On the performance of buildings coupled with earth to

air heat exchangers, *Solar Energy*, Volume 54, Issue 6, June 1995, Pages 375-380.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V50-3YYT5W8-2/2/26db7a57fd1d3509277d7d2879e7fd5c>)

63. Rakesh Kumar, S. Ramesh and S. C. Kaushik, Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-air-conditioned building, *Building and Environment*, Volume 38, Issue 6, June 2003, Pages 807-813.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V23-48CFFG8-1/2/3c57b4e4587622ea430dab9037457264>)